



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MOŽNOSTI SNIŽOVÁNÍ ODPORU POHYBUJÍCÍCH SE TĚLES V KAPALINÁCH INSPIROVANÉ PŘÍRODOU

POSSIBLE WAYS OF REDUCTION OF THE RESISTANCE OF A BODY MOVING IN LIQUIDS
INSPIRED BY NATURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

STANISLAV KREJČÍŘÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠTIGLER, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Stanislav Krejčířík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti snižování odporu pohybujících se těles v kapalinách inspirované přírodou

v anglickém jazyce:

Possible ways of reduction of the resistance of a body moving in liquids inspired by nature

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Odpor těles pohybujících se v kapalině a jeho snižování byl vždy předmětem zájmu mnoha techniků a vědeckých pracovníků. Cílem je dosáhnout vyšší rychlosti při stejném výkonu pohonu.

V příroda vybavila některá zvířata možnostmi jak tento odpor snižovat a tím jim umožnila dosahovat vyšších rychlostí než by se dalo očekávat na základě teoretických úvah. Příkladem jsou delfini a jiní vodní tvorové.

Cíle bakalářské práce:

Cílem této práce je,

seznámit se s teorií a praxí určování sil na obtékající tělesa. Dále by pak student provedl rešerši příkladů různých vodních živočichů, kteří využívají nějakého principu na základě kterého významně snižují svůj odpor při pohybu ve vodě. Dále by bylo zajímavé udělat rešerši různých technických řešení, která jsou již v současné době využívána.

Seznam odborné literatury:

Internet.

Munson, Young, Okiishi,: Fundamentals of fluid mechanics.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá možnostmi snižování odporu pohybujících se těles inspirované přírodou. V první části jsou popsány základní teoretické pojmy v problematice obtékání těles kapalinou. Dále jsou již uvedeni konkrétní mořští tvorové, kteří mají nějakým způsobem vyvinut mechanismus pro snížení odporu. Jedná se konkrétně o delfíny, žraloky a keporkaka. U těchto živočichů jsou ukázány možné aplikace a to nejen v technické praxi.

Klíčová slova

odpor tělesa, odtržení proudu, viskózní tlumení, ploutev s hrbolky, žraločí kůže

Abstract

The bachelor's thesis follows up the possible ways of body drag reduction, and it is inspired by nature. In the first part, basic theoretical concepts regarding bodies moving in liquids are described. Furthermore the thesis presents particular marine animals with developed mechanism for drag reduction. This includes dolphins, sharks and humpback whales. Possible technical and other applications are shown on these examples.

Key words

drag of body, flow separation, viscous damping, flipper with tubercles, shark skin

Bibliografická citace

KREJČÍŘÍK, Stanislav. *Možnosti snižování odporu pohybujících se těles v kapalinách inspirované přírodou*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Možnosti snižování odporu pohybujících se těles v kapalinách inspirované přírodou* vypracoval samostatně s pomocí odborné literatury, a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Brně dne 30. 5. 2014

Stanislav Krejčířík

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jaroslavu Štiglerovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a blízkým za podporu během psaní této práce.

Obsah

Úvod.....	9
1 Základní pojmy proudění.....	10
1.1 Druhy proudění	10
1.2 Rozdělení těles [1].....	11
1.3 Reynoldsovo číslo	11
1.4 Přechod z laminárního proudění do turbulence	12
1.5 Mezní vrstva [3]	12
1.6 Efekt tlakového gradientu	14
1.7 Možnosti zjištění povahy proudění [1]	15
1.7.1 Analytické řešení [1].....	15
1.7.2 Numerické řešení [8][26].....	17
1.7.3 Experimentální řešení [4].....	18
2 Odpor tělesa	20
2.1.1 Třecí odpor [1]	21
2.1.2 Tlakový odpor [1]	21
2.2 Součinitel odporu	22
2.2.1 Závislost tvaru [1]	22
2.2.2 Závislost Reynoldsova čísla [1]	23
2.2.3 Vliv stlačitelnosti [1]	25
2.2.4 Drsnost povrchu [1]	25
3 Inspirace vodními živočichy	27
3.1 Delfíni	27
3.1.1 Hydrodynamický tvar delfína	28
3.1.2 Grayův paradox [7].....	29
3.1.3 Viskózní tlumení.....	29
3.1.4 „Bublinková“ metoda	30
3.2 Keporkak	32
3.2.1 Morfologie ploutví	32
3.2.2 Test v aerodynamickém tunelu [6]	33
3.2.3 Výpočetní technika [10].....	34
3.2.4 Aplikace výrůstků v praxi.....	35
3.3 Žraloci	37
3.3.1 Optimalizace mikrodrážek [13]	38
3.3.2 Výroba mikrodrážek [13].....	39

3.3.3	Využití mikrodrážek pro snižování odporu	39
3.3.4	Účinky slizu a polymerních látek [13].....	40
4	Závěr	41
5	Seznam použitých zdrojů.....	42
6	Seznam obrázků.....	45
7	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	46
8	Seznam příloh	47

Úvod

Odpor těles při obtékání kapalinou a především jeho snižování byl vždy předmětem zájmu mnoha techniků a vědeckých pracovníků. Jejich snahou je najít co nejefektivnější způsob, jak navrhnout konstrukci, která by vykazovala co nejlepší hydrodynamické vlastnosti. Příroda vybavila živočichy speciálními mechanismy, které mohou být pro techniky a výzkumné pracovníky inspirací.

Vědní obor, který je systematicky zaměřen na uplatňování poznatků ze studia živých organismů a jejich struktur při vývoji nových technologií, se nazývá bionika. Název pro tuto vědní disciplínu je složen ze slov biologie a technika. V bionice se tedy spojuje příroda s technikou. Studium bioniky je zaměřené především na nové inovativní řešení konstrukčních úloh a technické materiály inspirované přírodními materiály. V přírodě můžeme objevit zvířata a rostliny nejrůznějších tvarů a barev. Stavba těla savců, ptáků a hmyzu se značně odlišují. Vývoj těchto forem je výsledkem dlouho trvajícího přizpůsobování se okolnímu prostředí. Nejen živočichové, ale i technické produkty musí být přizpůsobeny prostředí, ve kterém se budou užívat [5].

Už i Leonardo da Vinci, který proslul mimo jiné svými vynálezy, navrhoval plány létajících strojů podobajících se ptákům a netopýrům. Je možné, že právě tento významný renesanční člověk byl skutečně prvním bionikem. On sám ani jeho nástupci se tak ovšem nenazývali. Pojem bionika totiž vznikl poměrně nedávno. Pojmenoval ho americký vynálezce Otto Herbert Schmitt v polovině 20. století [5].

Existuje řada tvorů, jež využívají určitého principu pro snížení hydrodynamického odporu. Z této široké plejády živočichů se práce zabývá delfíny, žraloky a keporkakem.

1 Základní pojmy proudění

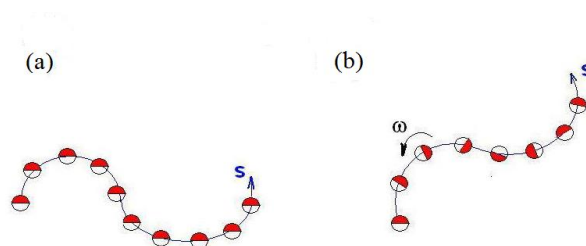
1.1 Druhy proudění

Proudění (obtékání, tok) kapalinou můžeme klasifikovat z různých hledisek.

Z pohledu fyzikálního lze proudění ideální kapaliny rozdělit na:

- a) potenciální (nevířivé)
- b) vířivé

Při potenciálním proudění se částice pohybují pouze translačním pohybem, částice se vůči pozorovateli neotáčí kolem své vlastní osy. Naopak u vířivého proudění částice konají vůči pozorovateli posuvný i rotační pohyb kolem své osy (obr. 1) [3].



Obr. 1: Proudění: (a) nevířivé, (b) vířivé [3]

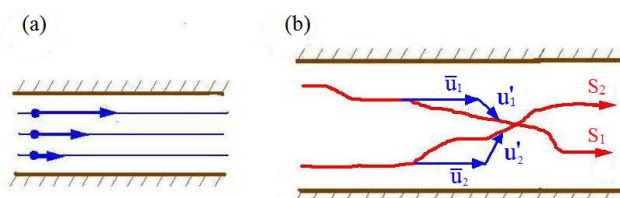
Dle časové závislosti rozlišujeme proudění na stacionární (ustálené) $u \neq u(t)$ tedy nezávislé na čase a nestacionární (neustálené) na čase závislé $u = u(t)$, kde u vyjadřuje rychlost proudění v kapalině.

Proudění reálné (skutečné) kapaliny lze rozdělit na:

- a) laminární
- b) turbulentní

Laminární proudění je takový druh proudění skutečné kapaliny, kdy se částice pohybují po vrstvách. Jednotlivé proudnice jsou rovnoběžné a nedochází k vzájemnému míšení kapaliny mezi sousední vrstvy.

Při turbulentním proudění se částice pohybují napříč středního proudu a vzájemně si vyměňují hybnost. Okamžitou rychlost lze rozložit na časově středovanou hodnotu ($\bar{u}$) a flukтуаční složku (u'), která má libovolný směr a způsobuje neustálý přechod částic z jedné vrstvy do druhé. [3].



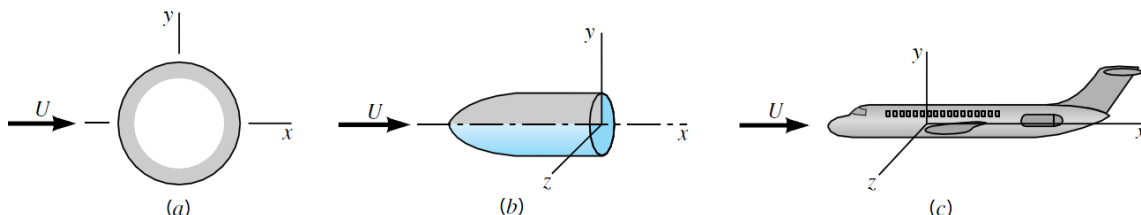
Obr. 2: Proudění: (a) laminární, (b) turbulentní [3]

Laminární a turbulentní proudění je uvedeno na obr. 2.

1.2 Rozdělení těles [1]

Struktura proudění a obtížnost určení jeho vlastností všeobecně závisí na povaze tělesa, které se v něm nachází. Těleso lze rozdělit dle tvaru do tří následujících skupin (obr. 3):

- a) dvourozměrné (nekonečně dlouhé těleso s konstantním průřezem po délce)
- b) osově symetrické (vytvořené rotací jeho průřezu kolem osy symetrie)
- c) trojrozměrné



Obr. 3: Typy tělesa: (a) dvourozměrné, (b) osově symetrické, (c) trojrozměrné [1]

Těleso můžeme také klasifikovat podle toho, jak velký nabývá součinitel odporu C_D , na:

- a) proudnicové (kapkovité, aerodynamické) - vykazuje nízkou hodnotu C_D , např. profil křídla letadla, tělo delfína
- b) špatně obtékané (zaoblené) - vykazuje vysokou hodnotu C_D , např. válec, koule, padák

O součiniteli odporu bude blíže pojednáno v kapitole 2.2.

1.3 Reynoldsovo číslo

Britský vědec a inženýr Osborne Reynolds patřil mezi významné osobnosti hydrodynamiky. V roce 1883 v jedné z jeho prací stanovil Reynoldsovo podobnostní číslo, které vyjadřuje poměr setrvačných a třecích sil působících na obtékané těleso [3]. Jedná se o podobnostní číslo definované dle vztahu:

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

kde U je charakteristická rychlost (v případě obtékání těles v neohraničeném proudu se jedná o rychlost nenarušeného proudu), d je charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita. Kinematická viskozita byla zavedena uměle, nemá žádný fyzikální význam. Lze ji vyjádřit pomocí dynamické viskozity vztahem $\nu = \eta/\rho$, kde η je dynamická viskozita a ρ hustota kapaliny. Dynamická viskozita již má své fyzikální opodstatnění. Souvisí se smykovým napětím působícím na povrch tělesa. Pokud v rovnici (1) dosadíme za kinematickou viskozitu vztah $\nu = \eta/\rho$, dostaneme druhý tvar Re-čísla [1]:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot d}{\eta} \quad (2)$$

Reynoldsovo číslo je velmi významný bezrozměrný parametr. Díky tomuto číslu lze porovnávat výsledky proudění v různých médiích s odlišnou viskozitou. Reynoldsovo číslo slouží k určení, o jaký typ toku se jedná, zdali jde o laminární nebo turbulentní proudění.

1.4 Přechod z laminárního proudění do turbulence

Nejdůležitější parametr určující přechod z laminárního proudění do turbulentního je Reynoldsovo číslo. Hodnota Re pro určení místa přechodu je závislá na řadě parametrů, mezi které patří drsnost povrchu, zakřivení plochy či poruchy proudění mimo mezní vrstvu [1].

Při přechodu z laminárního do turbulentního proudění dochází ke ztrátě stability laminárního toku při zvyšování Re -čísla. V laminární vrstvě existují slabé poruchy, které jsou viskozitou kapaliny utlumeny. Když Re -číslo dosáhne určité kritické hodnoty (Re_{kr}), proudění přechází přes přechodové proudění do turbulentního režimu. Tuto kritickou hodnotu ovšem obecně není snadné určit [3]. Pro plochou desku se kritická hodnota pohybuje v rozmezí od $2 \cdot 10^5$ do $3 \cdot 10^6$ [1]. Při turbulentním proudění již poruchy proudění nejsou utlumeny viskozitou kapaliny a dochází k neuspořádanému pohybu částic [3]. Přechod z laminárního proudění do turbulence demonstruje obr. 4.



Obr. 4: Přechod z laminárního do turbulentního proudění [1]

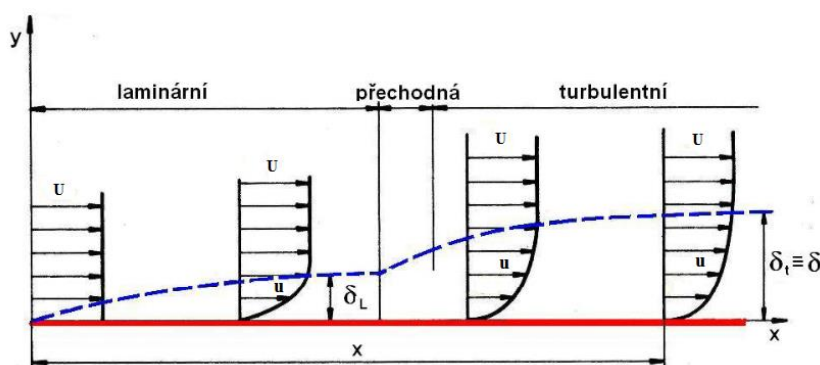
1.5 Mezní vrstva [3]

Pojem mezní vrstva se dá zjednodušeně znázornit na příkladu obtékání ploché desky, kdy směr nenarušeného proudu je s ní rovnoběžný.

Na základě experimentu bylo dokázáno, že v těsné blízkosti povrchu desky je velikost třecích sil (dokonce i v kapalině o nízké viskozitě) řádově srovnatelná s velikostí setrvačných sil. Proto zde nelze uvažovat ideální kapalinu. Kapalina na povrchu ulpí a směrem od tělesa se vytváří rychlostní profil.

Na povrchu desky mají částice nulovou rychlost. Ty vlivem viskozity zpožďují částice v sousední vrstvě ve směru osy y (obr. 5). Proto vzniká profil s proměnnou rychlostí, tedy gradient rychlosti, pro který platí: $\partial u / \partial y \neq 0$. Tento gradient určuje mezní vrstvu.

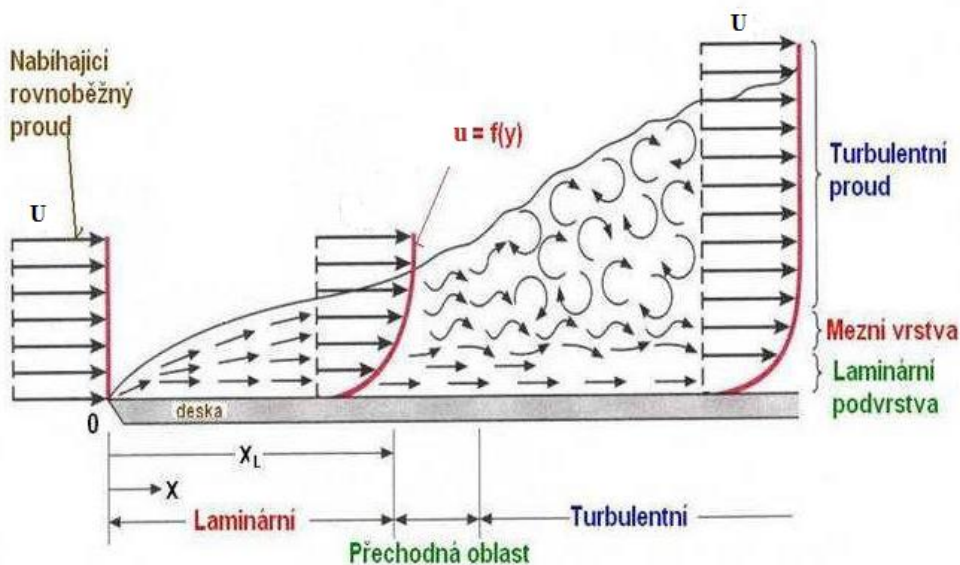
Proudění v mezní vrstvě je ovlivněno přítomností desky, oblast mimo mezní vrstvu má v podstatě rychlostní profil rovnoběžný a má velikost velmi blízkou velikosti rychlosti proudu v dostatečné vzdálenosti před deskou.



Obr. 5: Mezní vrstva na ploché desce [3]

Při obtékání desky (obr. 6) má kapalina v místě náběžné hrany (bod 0) rychlostní profil po celé své délce konstantní hodnotu. Tloušťka mezní vrstvy je na tomto místě nulová. Dále od náběžné hrany v kladném smyslu osy x se již vlivem viskozity vytváří proměnlivý rychlostní profil vytvářející mezní vrstvu. Jelikož se do mezní vrstvy přidávají další částice kapaliny, mezní vrstva směrem po proudu neustále nabývá na tloušťce. Tloušťka mezní vrstvy δ se smluvně definuje jako vzdálenost od povrchu desky do místa, kde velikost rychlosti dosáhne $0,99U$, kde U je velikost nenarušené (nabíhající) rychlosti.

Je-li nabíhající proudění bez turbulence, tak v přední části desky vzniká laminární mezní vrstva. Při hodnotě Re_{kr} přechází laminární vrstva do turbulentní. Přechod mezi laminární a turbulentní vrstvou charakterizuje přechodná oblast. V turbulentní mezní vrstvě se vyskytuje jistá laminární podvrstva, která si udržuje charakter laminárního proudění. Porovnáním rychlostního profilu laminární a turbulentní mezní vrstvy lze dojít k závěru, že turbulentní mezní vrstva má u stěny větší rychlostní gradient. Turbulentní režim také vykazuje větší tloušťku mezní vrstvy.



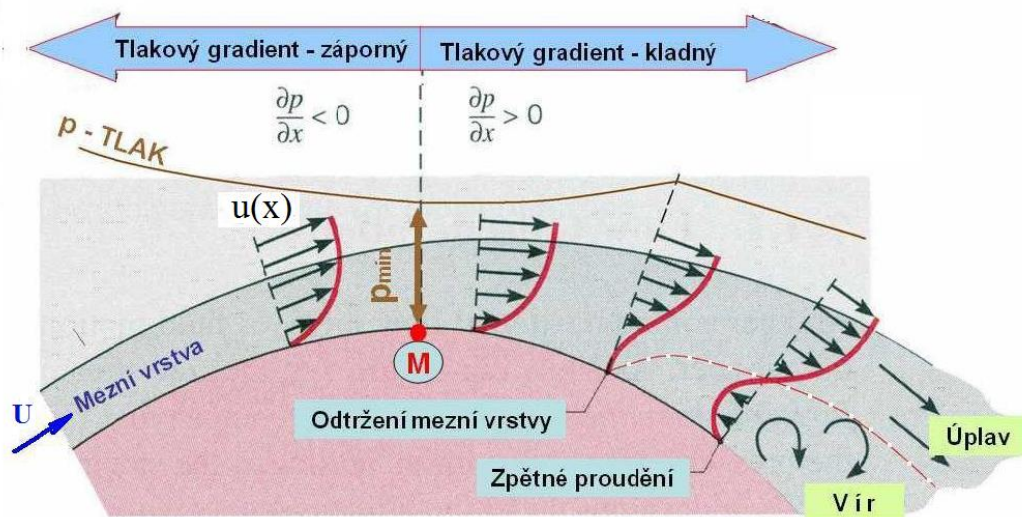
Obr. 6: Rychlostní profil u laminární a turbulentní mezní vrstvy [3]

1.6 Efekt tlakového gradientu

Pojednání o mezní vrstvě v předešlé kapitole se zabývalo prouděním kolem ploché desky, u které je podél jejího povrchu konstantní tlak. Všeobecně pro kapaliny proudící přes těleso libovolného tvaru není tlakové pole konstantní [1].

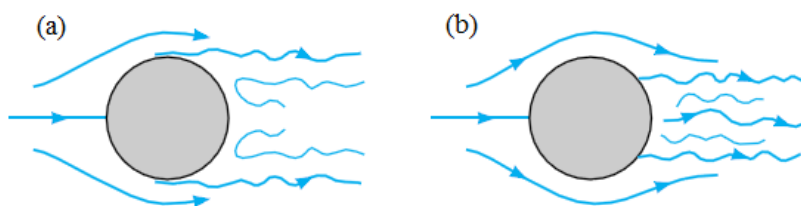
Pakliže je povrch tělesa zakřivený (válec, koule, křídlo letadla), tak se podél povrchu mění rychlost. S rostoucí rychlostí je spojeno i snížení tlaku. Tlak proudu na obr. 7 se do bodu M zmenšuje vlivem záporného tlakového gradientu $\partial p / \partial x < 0$. Dále od tohoto bodu je tlakový gradient kladný $\partial p / \partial x > 0$, dochází k nárůstu celkového tlaku na úkor snížení rychlosti proudu [3]. Z Prandtlovy rovnice mezní vrstvy plyne závěr, že změna tlaku napříč mezní vrstvou je nulová. To znamená, že tlak na hranici mezní vrstvy je stejný jako v mezní vrstvě až ke stěně (toto už úplně neplatí po odtržení mezní vrstvy).

Vlivem viskozity jsou po celém povrchu částice ubrzdovány, čímž u nich dochází k disipaci energie. V oblasti s rostoucím tlakem jsou navíc zpomalovány kladným (pozitivním) tlakovým gradientem. Tím v mezní vrstvě klesá rychlost a v tzv. inflexním bodě nastane situace, že stěna spolu s rychlostním profilem svírají pravý úhel. Od této chvíle dochází k zastavení částic kapaliny. S následným stále působícím kladným tlakovým gradientem již pohyb kapaliny směřuje proti směru původního proudu. Při vzájemném působení se základním proudem se částice postupně vzdalují od povrchu a dojde k tzv. odtržení proudu. Odplavený zpětný proud se nazývá úplav [3]. Odtržení proudu je spojeno se značným nárůstem celkového odporu z důvodu zvýšení tlakového odporu, proto je tento jev velmi nežádoucí.



Obr. 7: Održení proudu na zakřiveném povrchu [3]

O výskytu a místě, kde se proud odtrhne, rozhoduje tlakový gradient, ale také povaha proudění. Pro laminární proudění platí, že se vrstva odtrhne dříve než pro případ turbulentního proudění. To souvisí s tím, že při turbulentním proudění probíhá v mezní vrstvě intenzivní výměna hybnosti mezi částicemi a proto i za zvýšeného tření mají částice tendenci ztrácet kinetickou energii pomaleji. [3]. Proto za podmínek laminární mezní vrstvy je šířka úplavu větší než v případě turbulentní mezní vrstvy. Tuto skutečnost zobrazuje obr. 8 na příkladu obtékání válce.



Obr. 8: Šířka úplavu při proudění: (a) laminárním (b) turbulentním [1]

1.7 Možnosti zjištění povahy proudění [1]

Existují tři přístupy k zjištění informací o povaze proudění a určení sil na obtékající těleso. Mezi ně patří:

- analytický - řešením integrací pomocí rovnic
- numerický - pomocí simulačních metod
- experimentální - vyhodnocení na základě pokusu (experimentu)

Analytický přístup nám dává potřebné informace pouze pro taková proudění, u kterých jsme schopni určit konkrétní analytické vztahy pro popis daného proudového pole a geometrii obtékaného objektu. V dnešní době máme možnost (díky dostatečně sofistikovaným počítačovým programům) řešit i o něco obtížnější situace. Nicméně mnoho informací o vnějším proudění lze obdržet pouze experimentálně např. v aerodynamických či vodních tunelech.

1.7.1 Analytické řešení [1]

Jak již bylo zmíněno, analytické řešení lze provést pouze pro takové případy, kdy známe podrobné rozdělení smykového napětí a tlaku na celém povrchu obtékaného tělesa. Tyto informace jsou obvykle velmi těžko zjistitelné, avšak v některých situacích je lze získat.

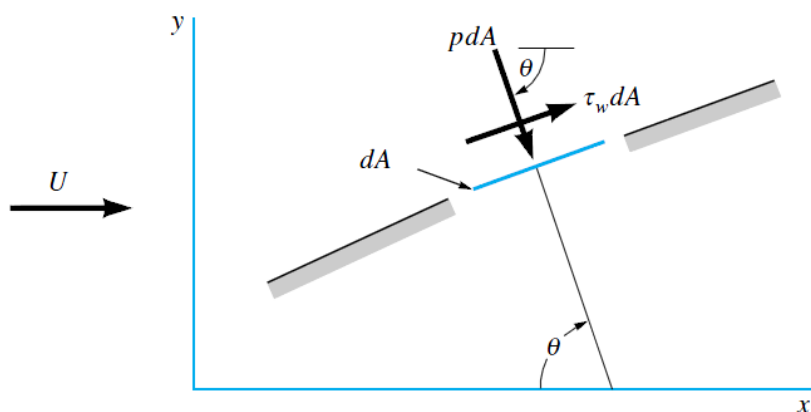
Obecně můžeme výsledné silové účinky proudu rozdělit na:

- odporovou sílu (odpor) F_D , působící ve směru nenarušeného proudu U
- vztlakovou sílu (vztlak) F_L , která působí kolmo na směr nenarušeného proudu U

U trojrozměrných těles dále definujeme boční sílu F_S , která je kolmá na rovinu obsahující síly F_D a F_L .

Výsledné rozložení smykového napětí a tlaku můžeme získat integrací dvou složek elementárních sil působících na element plochy dA , jak je uvedeno na obr. 9. Složky dF_x a dF_y lze vyjádřit:

$$\begin{aligned} dF_x &= (pdA) \cos \theta + (\tau_w dA) \sin \theta \\ dF_y &= -(pdA) \sin \theta + (\tau_w dA) \cos \theta \end{aligned}$$



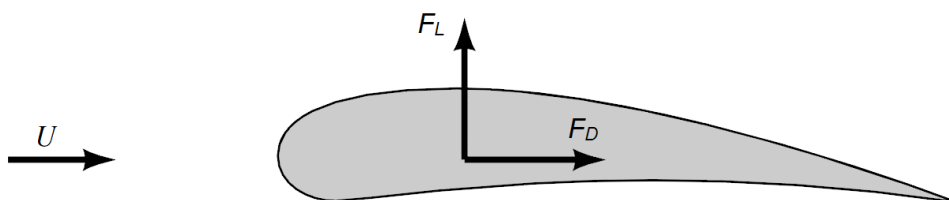
Obr. 9: Tlaková a třecí síla působící na element plochy povrchu tělesa [1]

Pokud provedeme integraci přes celou obtékanou plochu, dostaneme pro odporovou sílu F_D a vztlakovou sílu F_L následující rovnice:

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \quad (3)$$

$$F_L = \int dF_y = - \int p \sin \theta dA + \int \tau_w \cos \theta dA \quad (4)$$

Vztlaková a odporová síla působící na těleso je ukázána na obr. 10.

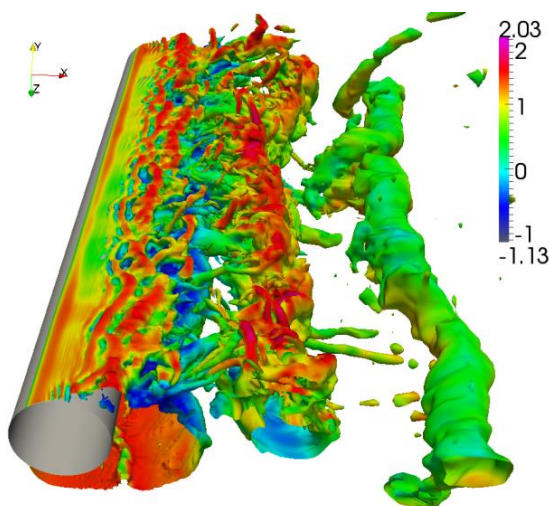


Obr. 10: Vztlaková a odporová síla působící na těleso [1]

1.7.2 Numerické řešení [8][26]

Jak bylo uvedeno výše, analytický přístup je omezen pouze na řešení jednoduchých případů obtékání těles. Pro složité situace existují zpravidla dva možné přístupy pro stanovení výsledných silových účinků působících na těleso. Jeden z nich je prostřednictvím výpočetních simulací proudění tekutin pomocí CFD (Computational Fluid Dynamics), což označuje matematicko - fyzikální numerické řešení proudění tekutin. Rozvojem výpočetní techniky tento přístup nabyl na značném významu. Touto metodou je v dnešní době možné řešit 2D a 3D problémy vcelku s příznivými výsledky. Pro smysluplné a relevantní výstupní hodnoty je velmi důležité zvolit vhodný numerický model, správné nastavení a vytvořit kvalitní síť prvků.

Popis proudění kapalin je charakterizován základními zákony zachování hmoty, hybnosti a energie. Zákony zachování hybnosti se označují jako Navier - Stokesovy rovnice. Těmito rovnicemi je popsáno laminární proudění. Tato soustava se obecně skládá z parciálních diferenciálních rovnic. V případě turbulentního proudění navíc jednotlivé členy obsahují časově středovanou a fluktuační hodnotu. To se projeví v navýšení neznámých, což jsou korelace fluktuací tlaku a rychlosti. Tímto se dostane soustava rovnic nazvaná jako RANS rovnice (Reynolds - Average Navier - Stokes rovnice). Kvůli tomu, že se navýšil počet neznámých, je třeba nalézt další rovnice, abychom měli stejný počet rovnic jako neznámých. To je umožněno definováním různých modelů turbulence. Při řešení turbulentního proudění zvyšují náročnost vyskytující se vírové struktury, které vykazují různou velikost. Pro tyto modely jsou také k dispozici metody LES (Large Eddy Simulation), metoda DES (Detached Eddy Simulation) či metoda DNS (Přímá numerická simulace). Na obr. 11 je zobrazena simulace proudění na příkladu obtékání válce metodou LES.



Obr. 11: Ukázka metody LES na obtékání válce [12]

1.7.3 Experimentální řešení [4]

Odpor na obtékající tělesa se zpravidla experimentálně zjišťuje v:

- a) aerodynamickým tunelu
- b) vodním tunelu

1.7.3.1 Aerodynamické tunely

Aerodynamické tunely jsou taková zařízení, kde proudí vzduch. Ten je v nich poháněn kompresorem či ventilátorem. Vektory rychlostí proudícího vzduchu jsou rovnoběžné. Podle rychlosti proudění lze aerodynamické tunely rozdělit na podzvukové (subsonické), kde $Ma < 1$ a nadzvukové (supersonické), kde $Ma > 1$ [4].

V aerodynamickém tunelu se dá měřit jednak síly působící na obtékané těleso, tak i pomocí měřicí techniky lze stanovit rychlostní pole v mezní vrstvě i mimo ni. Mezi nejběžnější metody pro řešení obtékání těles se používá metoda PIV a LDA. Aerodynamický tunel je charakterizován velikostí rychlosti, parametry turbulence a rozměrem měřicího prostoru [4].

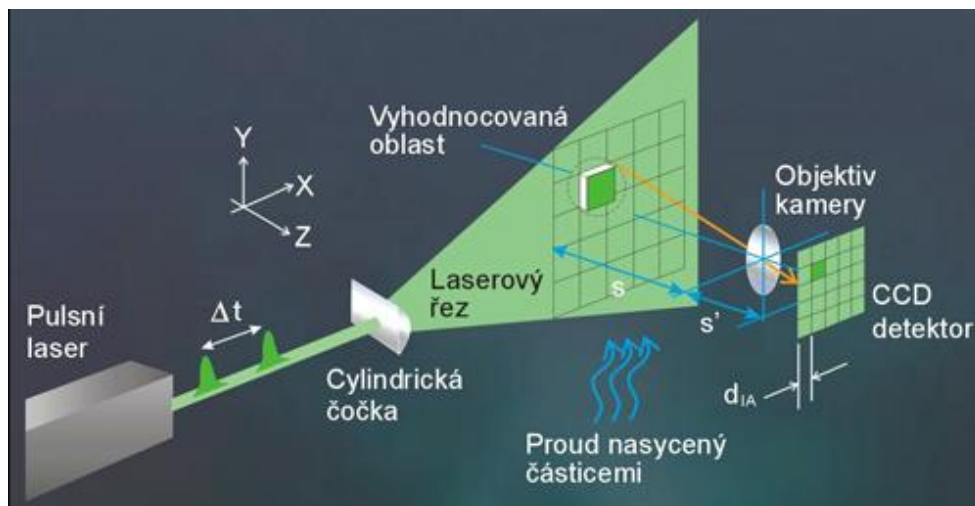
Následně bude uvedena metoda PIV, která patří mezi hojně používanou. Navíc touto metodou budou na Technické univerzitě v Liberci studovány účinky žraločí kůže na odpor proudění. Měření je naplánováno na červen letošního roku.

1.7.3.1.1 Metoda PIV [9]

Metoda Particle Image Velocimetry, neboli zkráceně PIV, patří mezi moderní měřicí a vizualizační metody pro výzkum proudění tekutin v provozních a laboratorních podmínkách. Principiálně jde o vizualizaci proudění zaváděním částic do tekutiny a následném snímání jejich polohy v krátkém časovém intervalu. Zpracováním obrazu pomocí počítače je pak možné určit vektorovou mapu rychlostí proudového pole. Velmi důležitým milníkem ve zpracování obrazů v proudící tekutině bylo zavedení počítačové podpory, což vedlo k podstatnému rozšíření praktického uplatnění původních vizualizačních metod.

Zařízení pro metodu PIV je na trh dodáváno v různých variantách. Pořízení tohoto zařízení je finančně velmi náročné. Rovina měřicího prostoru (vyhodnocované oblasti) je prosvěcována úzkým intenzivním laserovým pulzním paprskem, který je vedený optickým vláknem. Válcová čočka tento paprsek upravuje do tvaru světelného nože. Do této vyhodnocované oblasti je vpraven proud nasycených mikroskopických částic. Optické vlákno usnadňuje manipulaci s osvětlovacím zařízením v méně přístupných prostorách. Nahrazením válcové čočky čočkou s kulovým povrchem lze osvětlovat celý trojrozměrný prostor. Pro možnost počítačového zpracování měření se pro záznam obrazů používá CCD kamera napojená přes digitalizační kartu k počítači. Kameru lze nahradit fotoaparátem, čímž získáme obrazy s větším rozlišením. Obrazy fotoaparátu je ovšem potřebné digitalizovat a poté zpracovat počítačem. Pro zpracování obrazů je v počítači instalován speciální PIV procesor, ze kterého se získají data pro vektorovou mapu rychlostního pole z jednoho měření.

Pomocí metody PIV je možné získat obrazy z vizualizace pohybujících se částic (obr. 12) a v reálném čase vektorovou mapu rychlostí. Procesor pro zpracování dat může také generovat barevnou mapu rozložení rychlostí a čáry konstantních rychlostí.



Obr. 12: Schéma zařízení pro metodu PIV [27]

Mezi velké výhody této metody patří: Během testování se do proudění tekutiny neaplikují žádné rušící prvky, jako jsou snímací sondy. Touto metodou lze měřit 2D i 3D proudění. Jsme schopni měřit rychlosti od nulových až po nadzvukové. Mezi nevýhody se řadí především poměrně vysoká pořizovací cena a také to, že se měří rychlost vložených částic a ne vody. To klade značné nároky na volbu částic, které by měly mít stejnou hustotu jako proudící kapalina.

1.7.3.2 Vodní tunely

Vodní tunely jsou zařízení, které se používají pro testování hydrodynamického chování ponořených těles v proudící vodě. Tyto zařízení jsou velmi podobné k aerodynamickým tunelům. Pracovní látkou zde ovšem není vzduch ale voda. Měří se zde např. síly působící na zmenšený model ponorek nebo vztlak a odpor na plavidla. Hydrodynamické tunely se často vyžívají v místech aerodynamických tunelů, protože metody jako např. metoda PIV je poměrně snadno aplikovatelná na vodní prostředí. Při zachování stejné hodnoty Reynoldsova čísla jsou výsledky porovnatelné, i když je těleso obtékáno proudem vzduchu nebo vody [24]. Důležité je zachovat pro oba režimy stejnou hodnotu Re-čísla.

2 Odpor tělesa

Pro tělesa, která jsou obtékána ideální kapalinou (tj. kapalinou o nulové viskozitě), platí, že kapalina neklade tělesu žádný odpor, protože lze předpokládat, že dokonale sleduje povrch tělesa. Při obtékání tělesa reálnou kapalinou dochází vlivem viskozity ke vzájemné silové interakci mezi kapalinou a obtékaným tělesem [2].

Odpor tělesa můžeme rozdělit na tyto složky:

- Třecí odpor F_{Df} , který je dán účinkem smykových (třecích) napětí, působících na povrch obtékaného tělesa v mezní vrstvě.
- Tlakový (tvarový) odpor F_{Dp} , který je dán účinkem tlaku působící na povrch tělesa.
- Indukovaný odpor F_{Di} , který je spojen se vznikem rozběhových vírů, které působí na konci profilu při obtékání těles konečné délky.

Ve většině případů je ovšem celkový odpor složen jen z tlakového a třecího odporu [2].

Za předpokladu že je nám známo rozložení tlaku p a smykového napětí τ_w na povrchu tělesa, lze celkový tlakový a třecí odpor získat analyticky. Současný pokrok ve výpočtech proudění tekutin (tj. používání simulačních metod k řešení řídicích rovnic proudového pole) poskytl slibné výsledky při obtékání složitějších tvarů těles [1].

Většina informací týkajících se odporu objektů jsou výsledkem mnoha experimentů především v aerodynamických tunelech a dalších zařízeních, která jsou používána k měření odporu na modelech skutečných těles. Výsledné účinky odporu na obtékající těleso mohou být interpretovány v bezrozměrné formě [1]. Výstupem pro daný tvar objektu je součinitel odporu C_D definovaný dle vztahu:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (5)$$

kde F_D je odporová síla, U nenarušená rychlost, ρ hustota kapaliny a A je bráno jako obsah tzv. charakteristické plochy. Charakteristická plocha je zpravidla definována jako čelní plocha obtékaného tělesa, tj. průmět plochy při pohledu na objekt ve směru nenarušeného proudění. V jiných situacích může být A určeno jako plocha průmětu tělesa do půdorysu, tj. promítnutá plocha při pohledu shora na objekt v kolmém směru na nenarušenou rychlost. V některých případech se také může jednat o plochu obtékaného tělesa. Je samozřejmé, že výběr charakteristické plochy záleží na tvaru a rozměrech tělesa a v jednotlivých případech musí být jasně uvedeno, která plocha je uvažována [1].

Součinitel odporu C_D je ovšem funkcí dalších bezrozměrných parametrů, jako je Reynoldsovo číslo (Re), Machovo číslo (Ma) a relativní drsnost ε/d [1]. Tj.

$$C_D = f(tvar, Re, Ma, \varepsilon/d)$$

2.1.1 Třecí odpor [1]

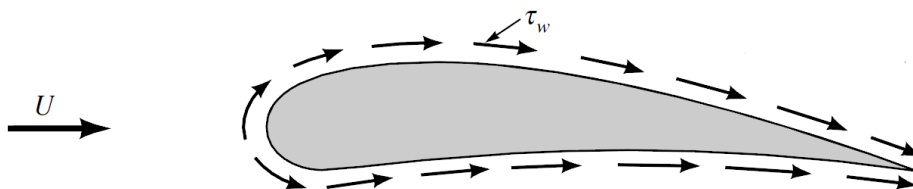
Třecí odpor je část odporu, který vzniká v důsledku smykového (třecího) napětí τ_w působící na povrch tělesa. Je závislý nejen na velikosti třecího napětí τ_w , ale také na orientaci plochy, na kterou působí. Jestliže je plocha rovnoběžná s nenarušenou rychlostí U , pak se celkový odpor rovná třecímu odporu. Pakliže je plocha kolmá na nenarušenou rychlost, celkový třecí odpor je nulový.

Třecí odpor pro plochou desku o šířce b a délce l , která je orientována rovnoběžně se směrem nenarušeného proudění lze vyjádřit dle vztahu:

$$F_{Df} = \frac{1}{2} \rho U^2 b l C_{Df} \quad (6)$$

kde C_{Df} je součinitel třecího odporu. Hodnota C_{Df} je obecně závislá na Reynoldsově číslu Re a relativní drsnosti ε/d . Stejně jako pro 1D proudění v potrubí i zde platí, že pro laminární proudění je C_{Df} závislý pouze na Re -číslu. Při turbulentním režimu významně ovlivňuje hodnotu C_{Df} pouze relativní drsnost. Při přechodném proudění je důležité brát v úvahu jak Re , tak i relativní drsnost.

Analytické učení třecího odporu je možné pouze u jednodušších těles. V případě složitějších těles se zdá být analytický výpočet jako velmi složitý a v určitých případech téměř neuskutečnitelný, proto hodnota třecího odporu je určována experimentálně, nejčastěji je zahrnuta v celkovém odporu. Rozložení třecího napětí v podélném řezu profilu je zobrazeno na obr. 13.



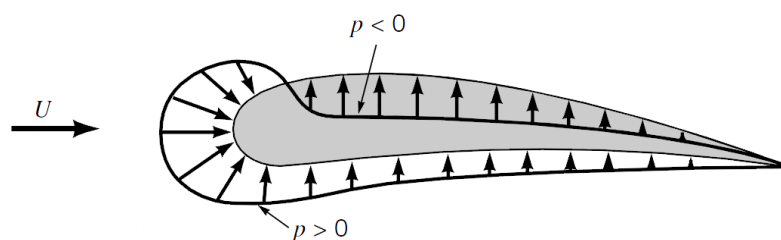
Obr. 13: Rozložení třecího napětí na 2D tělese [1]

2.1.2 Tlakový odpor [1]

Tlakový odpor je přímo spojený s tlakem kapaliny působící na těleso. Často bývá označován jako tvarový odpor a to z důvodů jeho silné závislosti na tvaru obtékaného tělesa. Tlakový odpor je tedy funkcí velikosti tlaku a orientaci elementu povrchu, na který tlak působí. Velikost tlakového odporu lze získat ze vztahu:

$$F_{Dp} = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_{Dp} \quad (7)$$

kde C_{Dp} je součinitel tlakového odporu. Rozložení tlaku na 2D tělese je zobrazeno na obr. 14.



Obr. 14: Rozložení tlaku na 2D tělese [1]

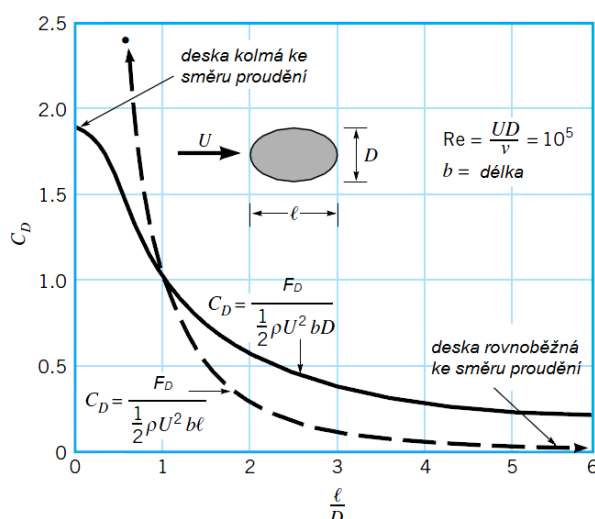
2.2 Součinitel odporu

Jak již bylo uvedeno, celkový odpor se skládá ve většině případů z odporu třecího a tlakového. Téměř vždy jsou tyto složky posuzovány společně ve formě celkového součinitele odporu C_D [1]. V následujícím textu budou uvedeny parametry, na kterých je součinitel odporu závislý.

2.2.1 Závislost tvaru [1]

Součinitel odporu značně ovlivňuje tvar objektu. Proudnicová (kapkovitá) tělesa se vyznačují nízkou hodnotou součinitele odporu, zatímco tělesa zaoblená (např. válec či koule) nabývají vyšších hodnot.

Odpor na těleso s příčným průřezem elipsy o štíhlosti l/D , kde D je výška a l délka elipsy dobře ilustruje závislost součinitele odporu na tvaru tělesa. Součinitel odporu $C_D = F_D/(\rho U^2 b D/2)$, závisí na čelní ploše $A=bD$, kde b je délka kolmá na směr nenarušené rychlosti U . Je-li $l/D=0$ jedná se o případ ploché desky kolmé ke směru proudění. Pro tuto situaci dostaneme pro desku $C_D=1,9$. Se zvyšujícím se l/D se snižuje hodnota C_D .

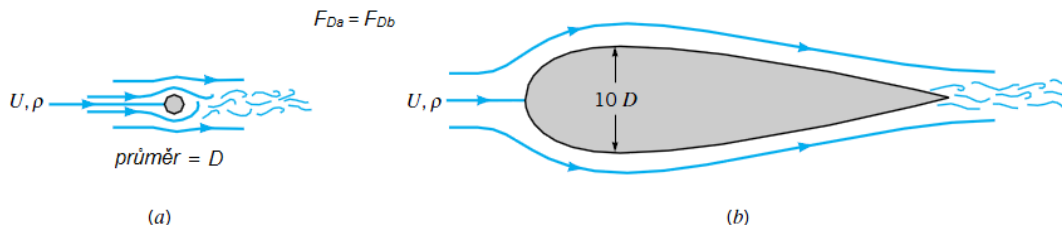


Obr. 15: Závislost součinitele odporu na štíhlosti [1]

bude stejný. To pouze poukazuje na dva odlišné přístupy k zjištění stejné informace. Závislost součinitele odporu na štíhlosti tělesa je zachycena na obr. 15.

Pro tělesa s vysokou štíhlostí ($l/D \rightarrow \infty$) se elipsa chová jako plochá deska rovnoběžná se směrem nenarušeného proudění. Pro tyto případy třecí odpor zpravidla nabývá vyšších hodnot jak odpor tlakový. V těchto situacích je zvykem brát v rovnici pro výpočet součinitele odporu jako charakteristickou plochu obsah průmětu tělesa do půdorysu, tj. $A=b.l$, kde b je délka tělesa kolmá na směr proudění. Zde bude mít součinitel odporu podobu $C_D = F_D/(\rho U^2 b l/2)$. Je zřejmé, že odpor získaný z obou vztahů

Je velmi zajímavé, že odpor na 2D tělesa uvedené na obr. 16 je při stejných podmínkách proudění totožný. Šířka úplavu pro těleso s proudnicovým tvarem je relativně malá ve srovnání se šířkou úplavu válce vzhledem k jeho průměru D .



Obr. 16: (a) válec $C_D = 1,2$; (b) těleso proudnicového tvaru $C_D = 0,12$ [1]

2.2.2 Závislost Reynoldsova čísla [1]

Dalším parametrem, na kterém je součinitel odporu závislý, je Reynoldsovo číslo Re . Základní kategorie závislosti Reynoldsova čísla jsou:

- proudění s velmi nízkým Re
- proudění se střední hodnotou Re (laminární mezní vrstva)
- proudění při vysoké hodnotě Re (turbulentní mezní vrstva).

Příklady těchto situací budou uvedeny níže.

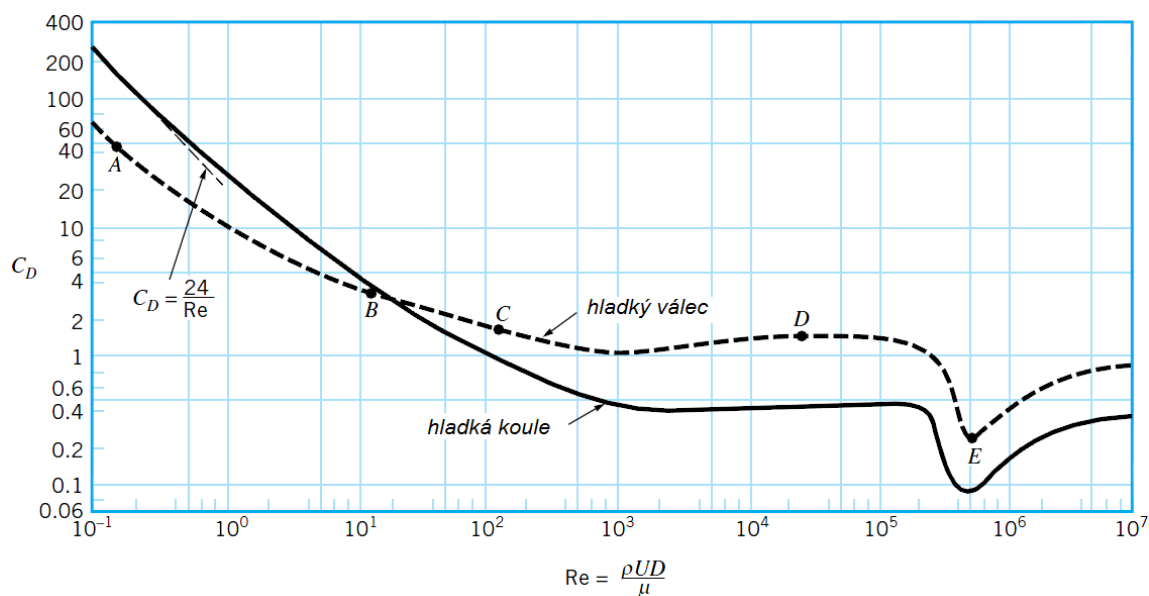
Pro proudění s velmi nízkou hodnotou Re ($Re < 1$) lze součinitel odporu definovat vztahem:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 l^2} = \frac{2C\mu l U}{\rho U^2 l^2} = \frac{2C}{Re} \quad (8)$$

kde $Re = \rho U l / \mu$ a C je konstanta závislá na tvaru tělesa. Vidíme tedy, že součinitel odporu je nepřímo úměrný Re . V tomto režimu se těleso pohybuje tzv. „plíživým“ pohybem.

Proudění se střední hodnotou Re -čísla má tendenci přijmout strukturu proudění mezní vrstvy. Pro proudění přes proudnicová tělesa má součinitel odporu tendenci se zvyšujícím se Re mírně klesat. Pro zaoblená tělesa má v rozmezí $10^3 < Re < 10^5$ součinitel odporu přibližně konstantní závislost. Tato závislost je ukázána na obr. 17.

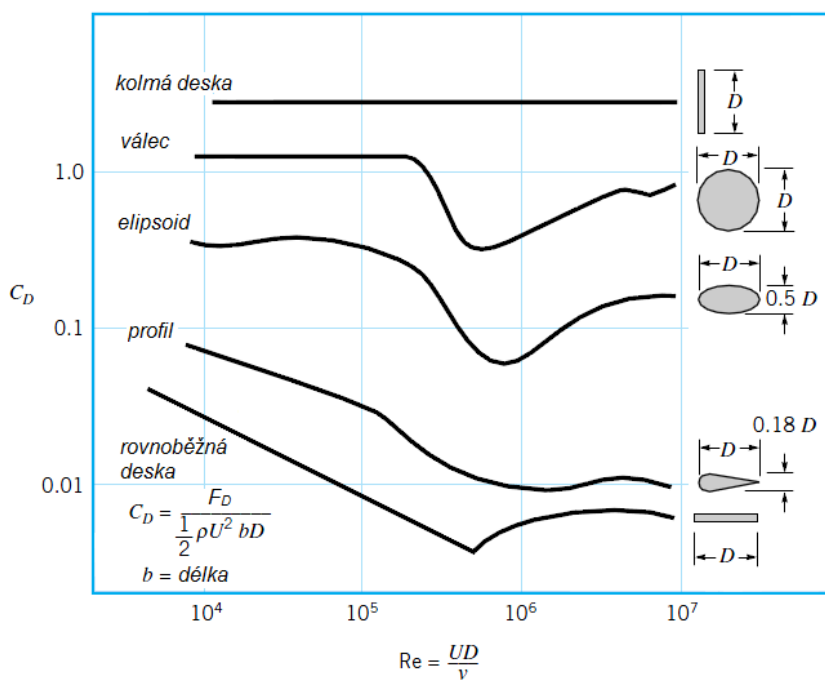
Pro proudnicová tělesa součinitel odporu vzroste, jakmile proudění v mezní vrstvě přejde z laminárního do turbulentního proudění, protože pro tyto tělesa má v celkovém odporu mnohem větší zastoupení třecí odpor, který nabývá vyšších hodnot při turbulentním proudění. Naopak pro zaoblená tělesa typu válce či koule je přechod z laminárního do turbulentního proudění spojen se snížením součinitele odporu. Jak je ukázáno v kapitole 1.5, při turbulentním proudění je oddalováno odtržení proudu na zadní straně válce. Výsledkem je menší šířka úplavu, což vede ke snížení tlakového odporu. To je znázorněno na obr. 17 náhlým poklesem C_D v rozmezí $10^5 < Re < 10^6$. V tomto rozsahu při zvyšující se rychlosti nejen že klesá součinitel odporu, ale dokonce i samotný celkový odpor F_D . Pro hodnoty Re mimo uvedený interval platí, že při vzrůstající hodnotě nenarušené rychlosti proudu se zvyšuje i celkový odpor, ačkoliv součinitel odporu C_D může klesat.



Obr. 17: Součinitel odporu v závislosti na Reynoldsově čísle pro hladkou kouli a válec [1]

Pro plochou desku, která je orientována kolmo ke směru proudění platí, že proud se oddělí na okraji desky bez ohledu na tom, o jaký typ proudění se jedná. Z toho plyne, že součinitel odporu v této situaci vykazuje nízkou závislost na Reynoldsově čísle.

Závislosti součinitele odporu na Reynoldsově čísle pro dvourozměrná tělesa různých tvarů ukazuje obr. 18.



Obr. 18: Závislost součinitele odporu na Re pro dvourozměrná tělesa různého tvaru [1]

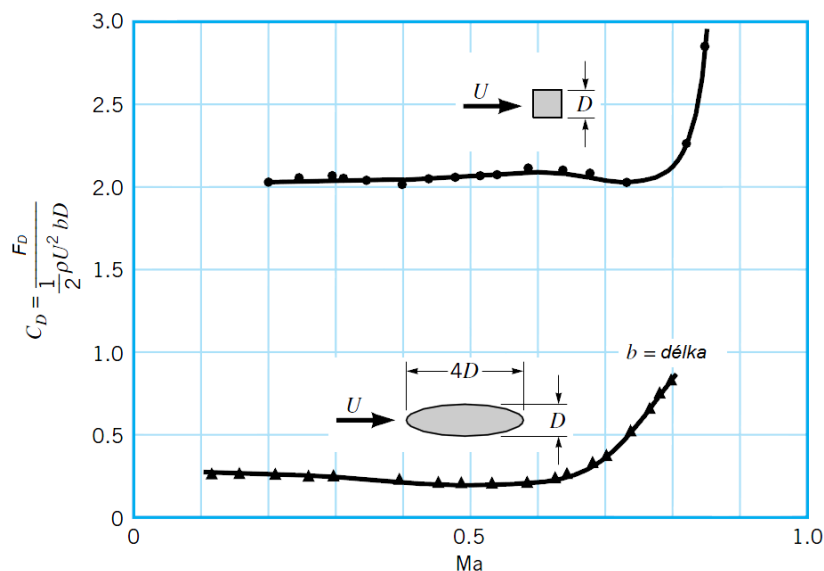
2.2.3 Vliv stlačitelnosti [1]

Výše uvedený rozbor je omezen předpokladem nestlačitelné kapaliny. Jestliže je rychlost kapaliny dostatečně velká, vliv stlačitelnosti je již podstatný a součinitel odporu je funkcí jak Re tak i Machova čísla Ma , tj. $C_D = f(Re, Ma)$. Machovo číslo definujeme vztahem:

$$Ma = \frac{U}{c} \quad (9)$$

kde c je rychlost zvuku v kapalině.

Obecně lze říci, že pro hodnoty $Ma < 0,5$ je součinitel odporu v podstatě nezávislý na Machově čísle, tzn. vliv stlačitelnosti není významný. Pro vyšší hodnoty Machova čísla (tj. $Ma > 0,5$) C_D silně závisí na hodnotě Ma a je nutnost brát v úvahu i stlačitelnost kapaliny [1]. Závislost součinitele odporu na Machově čísle ukazuje obr. 19.



Obr. 19: Součinitel odporu v závislosti na Ma pro dvourozměrná tělesa [1]

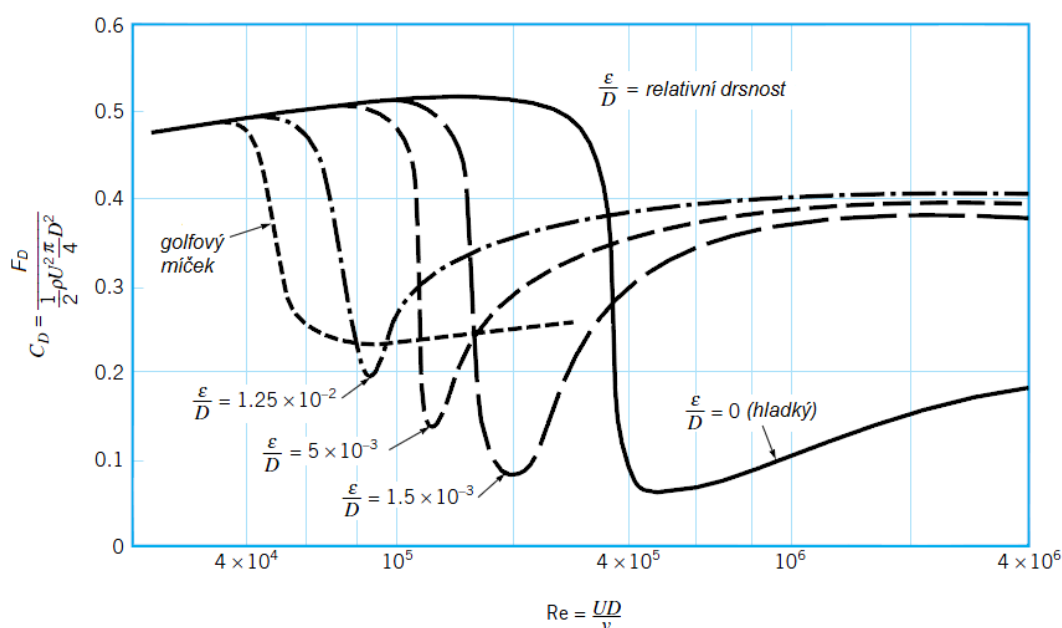
2.2.4 Drsnost povrchu [1]

Jak již bylo uvedeno výše, při obtékání ploché desky, která je rovnoběžná se směrem proudění, je součinitel odporu závislý na drsnosti povrchu za předpokladu, že proudění v mezní vrstvě je turbulentní. V těchto případech nerovnosti na povrchu tělesa vyčnívají skrz laminární podvrstvu a tím zvyšují smykové napětí. Kromě efektu zvýšení smykového napětí může drsnost povrchu významně ovlivnit kritickou hodnotu Re , při které již nastane turbulentní proudění.

Všeobecně pro tělesa proudnicového tvaru platí, že spolu se zvyšující se hodnotou drsnosti povrchu se navyšuje i celkový odpor. Proto se konstruktéři letadel musí při návrhu křídel zaměřit na to, aby jeho povrch byl co možná nejhladší. Případné vyčnívající nýty či hlavy šroubů v konstrukci by mohly významně zvýšit celkový odpor.

Na druhou stranu pro zaoblená tělesa typu válce či koule může nastat zcela opačná situace jak u proudnicových těles. Jak je ukázáno na obr. 6 v kapitole 1.5, když Re dosáhne určité kritické hodnoty ($Re_{kr} \approx 3 \cdot 10^5$ pro hladkou kouli) mezní vrstva se stane turbulentní. Při turbulentním proudění je šířka úplavu menší než při laminárním proudění. Výsledkem je značný pokles tlakového odporu, naopak třecí odpor mírně vzroste. Celkový odpor se ovšem sníží.

Přechod do turbulentního proudění může být urychleno zdrsňením povrchu koule. Příkladem je golfový míček, který je na svém povrchu pokryt sítí důlků. Kritická hodnota Reynoldsova čísla pro golfový míček je přibližně rovna $Re_{kr} = 4 \cdot 10^4$. V rozsahu $4 \cdot 10^4 < Re < 4 \cdot 10^5$ je odpor na golfový míček mnohem menší jak na hladký míček stejného průměru (obr. 20). Právě v tomto rozmezí Re se pohybuje golfový míček za letu při správně provedeném odpalu.



Obr. 20: Součinitel odporu v závislosti na Re pro kouli [1]

3 Inspirace vodními živočichy

V přírodě je plno příkladů materiálů a struktur povrchů, jejichž vlastnosti lze využít pro technické aplikace. Vědní obor, který se inspiruje efektivními mechanizmy nalézající se v přírodě a poté vhodnou aplikací v technické sféře, se nazývá bionika. Tento vědní obor je poměrně mladý, pojmenoval ho v polovině 20. století americký vynálezce Otto Herbert Schmitt. Příroda vytvořila možnosti jak snížit odpor v proudící kapalině. To je patrné v efektivním pohybu ryb, delfínů, žraloků a dalších vodních živočichů [13].

Při pohybu mořských živočichů klade voda značný odpor. Je to dáno kvůli její poměrně velké hustotě a viskozitě. Důsledky jak pro vodní zvířata, tak i pro mořská plavidla jsou velké energetické nároky na pohyb a omezení rychlosti. Vodní živočichové mají vyvinuty hydrodynamické mechanismy pro zvýšení hnací síly nebo pro snížení odporu. Inženýři se zaměřují především na snížení odporu konstrukcí [7].

3.1 Delfíni

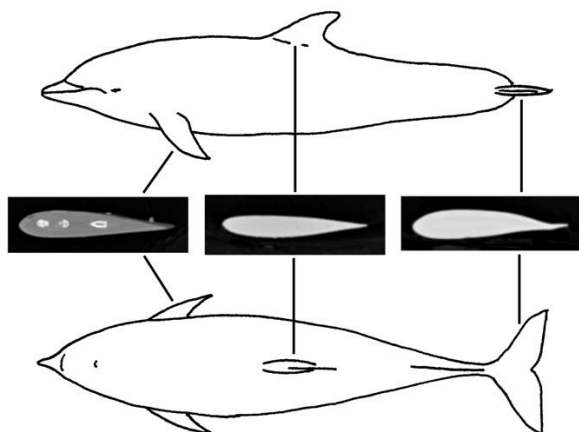
Vysokorychlostní plavání delfínů (obr. 21) bylo uvedeno v mnoha záznamech dějin. Nejstarší zmínka o studování delfiních vlastností pochází od slavného Aristotela, který považoval delfíny vůbec za nejrychlejší zvířata v celé živočišné říši, kteří jsou schopni přeskakovat stožáry lodí [7].



Obr. 21: Delfín skákavý [14]

Nedůslednost výpočtu odporu aktivně plovoucích delfínů a podceňování výkonu svalové hmoty vyústilo v to, co bylo nazváno Grayovým paradoxem. I když Grayův předpoklad byl chybný, stal se inspirací pro řadu mechanismů pro snižování odporu. Aerodynamický tvar delfína poskytuje největší snížení odporu delfínů [7]. Principy, které využívá delfín ke snížení odporu, a které by bylo možné využít v technické praxi, jsou hydrodynamický tvar těla a viskózní tlumení kůže, které oddaluje přechod z laminárního do turbulentního proudění.

3.1.1 Hydrodynamický tvar delfína



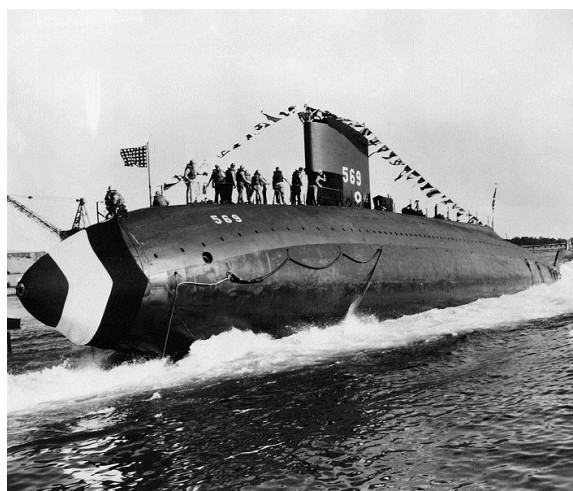
Obr. 22: Boční a horní pohled na delfína a na jeho příčné průřezy ploutví [7]

o optimálním tvaru tělesa pro co nejnižší odpor je dán štíhlostí tělesa (tj. poměr maximální šířky k maximální výšce profilu). Optimální štíhlost poskytuje minimální odpor pro daný objem. Obecně platí, že delfini a velryby mají hodnoty štíhlosti od 3,3 do 8 [7]. Aerodynamický tvar delfína má místo maximální tloušťky v rozmezí od 34 do 45% (bráno od přední části těla) z celkové délky těla. Protože až za tímto bodem se objevuje kladný tlakový gradient, dochází k omezení odtržení mezní vrstvy, což má za následek nižší odpor [23].

Zkoušky na živých delfínech neprokázaly na povrchu těla významné odtržení proudů. Tvar v příčném řezu ploutví má aerodynamický charakter, tento tvar snižuje tlakový a indukovaný odpor. Indukovaný odpor je vyvolán vířivostí, vytvářející se se zvedáním nosné plochy. Když je nosná plocha obtékána proudem pod určitým úhlem náběhu, vytváří se vztlačová síla v důsledku rozdílu tlaku mezi horní a dolní plochou obtékaného tělesa. Tento tlakový rozdíl indukují tvorbu okrajových (rozběhových) vírů, což vede k disipaci energie. Efektivním tvarem tělesa se maximalizuje poměr vztlačové síly k síle odporové.

Vysoká štíhlost profilu a zužující se ploutve redukují sílu okrajových vírů a tím i indukovaný odpor. U delfínů a velryb se štíhlost ploutví pohybuje v rozmezí od 2-6,2. Indukovaný odpor je také limitován tvarem končetin a šípovitostí profilu ploutve. Delfini mají trojúhelníkový tvar ploutví. Právě tento tvar zaručuje nízký hydrodynamický odpor.

Proudnicový tvar těla a ploutví minimalizuje odpor. Potenciál pro snížení odporu optimálním tvarem objektu vedlo inženýry a vědce k brzkému výzkumu. Moderní ponorky od rozvoje experimentální ponorky USS Albacore (obr. 23) v roce 1953, využívají proudnicového tvaru trupu, který je podobný k tvaru těla delfína, ačkoliv tato podobnost byla vyvinuta nezávisle na sobě. Zaoblený přední okraj a pomalu se zužující zadní část těla charakterizuje efektivní profil těla delfína (obr. 22). Tento tvar oddaluje odtržení proudů, které se vyskytuje až v blízkosti odtokové hrany. Údaj



Obr. 23: Americká experimentální ponorka USS Albacore (AGSS-569) [22]

3.1.2 Grayův paradox [7]

Spor známý jako Grayův paradox je považován za první snahu o vyhodnocení energetické náročnosti plavání delfínů. Britský zoolog James Gray v roce 1936 stanovil jednoduchý výpočet založený na pozorování delfínů plovoucích podél lodi. Zjistil, že delfín kolem plavidla dosahoval rychlosti až $10,1 \text{ m.s}^{-1}$. Na základě tohoto pozorování Gray vytvořil hydrodynamický model, který považoval za tuhý. Tento model o rozměrech delfína vystavil rychlosti $10,1 \text{ m.s}^{-1}$. Pro jeho výpočet Gray předpokládal, že v mezní vrstvě je plně vyvinuto turbulentní proudění. Usuzoval tak vzhledem k rychlosti a velikosti delfína. Z výsledků výpočtů vyplynulo, že delfíní svaly nejsou schopny vyvinout takovou sílu, aby dosáhli požadované rychlosti při turbulentních podmínkách. Za předpokladu že výkon svalů delfína se nijak neliší od ostatních savců, tak by k udržení laminární mezní vrstvy tvor potřeboval přes 110 kg svalové hmoty. Delfín ovšem disponuje přibližně 15 kg. Gray vysvětlil tento problém tím, že delfíní mají schopnost si udržovat plně laminární mezní vrstvu po celém povrchu těla. Domníval se tedy, že delfíní mají vyvinut mechanismus pro „laminarizaci“ mezní vrstvy. Tento základní předpoklad byl brán v úvahu až do konce 20. století.

Grayova domněnka byla chybná, protože pozoroval delfíny na lodi, kolem které proplouvali od zádi přes celou její délku a využívali toho, že loď „prorážela“ vodní proud a tím voda kladla delfínu menší odpor. Tím byla rychlost delfína uměle zvýšena. Navíc delfín plaval od zádi k přídi lodi po dobu 7 sekund, je proto vysoce pravděpodobné, že k tomuto pohybu využíval tzv. rychlých svalových vláken. Gray ovšem tuto situaci porovnával s výkonem pomalých svalových vláken sportovních veslařů. Rychlá svalová vlákna jsou ovšem schopná produkovat 2-17 krát vyšší výkon než ty pomalá.

Turbulentní mezní vrstva zpožďuje odtržení proudu z delfíní kůže. Tato vrstva zaručuje úzký úplav a redukcí tlakového odporu. V podmínkách laminární mezní vrstvy je ve srovnání s turbulentní vrstvou pravděpodobnější odtržení proudu. Ve skutečnosti je delfín přizpůsoben k plavání ve vysokých rychlostech v krátkých časových úsecích při zachování plně vyvinuté turbulentní mezní vrstvy.

3.1.3 Viskózní tlumení

Představa, že může být zachována laminární mezní vrstva po celé délce povrchu těla, inspirovala vědce k uskutečnění dalších experimentů. V roce 1960 Max O. Kramer tvrdil, že delfíní kůže, která je hladká a poddajná, je prostředkem k dosažení laminární mezní vrstvy bez odtržení proudu. Kůže by podle něj měla mít schopnost se deformovat a tím snížit odpor prostřednictvím viskózního tlumení. Právě poddajnost kůže, která má elastické vlastnosti, by měla způsobovat toto tlumení. Díky těmto vlastnostem by kůže měla být schopna absorbovat energii z kolísání tlaku a mírnit vlivy turbulentních nepravidelností a tím udržovat laminární proudění. V jistém slova smyslu by kůže fungovala jako tlumič, který by tlumil prvotní nepravidelnosti toku zvané jako Tollmien–Schlichtingovy vlny, které jsou prvopočátkem pro přechod do turbulentní mezní vrstvy [7].

Kramer na důkaz zkonstruoval torpédo potažené umělou kůží, která jistým způsobem napodobovala kůži delfína. Při testování bylo zjištěno snížení třecího odporu o 59% s porovnáním s modelem s plně turbulentním prouděním. Později se ovšem tyto výsledky nepotvrdily. Struktura kůže a tukové vrstvy je natolik složitá, že potah torpéda navrhovaný Kramerem přesně neodpovídal skutečné struktuře delfiní kůže a tím může mít výsledek experimentu nízkou vypovídající hodnotu [7].

Pružnost delfiní kůže je způsobena velkým množstvím organizovaných kolagenních a elastických vláken. Elastické vlastnosti kůže jsou závislé především na hloubce tukové vrstvy pod kůží. Tuková vrstva je vysoce odolná s modulem pružnosti podobným kaučuku. Pružnost kůže a tuková vrstva může absorbovat tlakové pulsace v důsledku tokových nepravidelností (poruch) a tím udržovat příznivý tlakový gradient pro udržení stabilní mezní vrstvy [7].

Bylo zjištěno, že poddajná kůže není schopna udržet plně laminární mezní vrstvu, avšak oddaluje přechod z laminární mezní vrstvy na turbulentní. Tato úspora v hydrodynamickém odporu je ovšem jen v několika málo procentech. Jisté studie hovoří o 7% snížení odporu. Proto i tento mechanismus neobjasňuje podstatu vysoké rychlosti plavání delfínů.

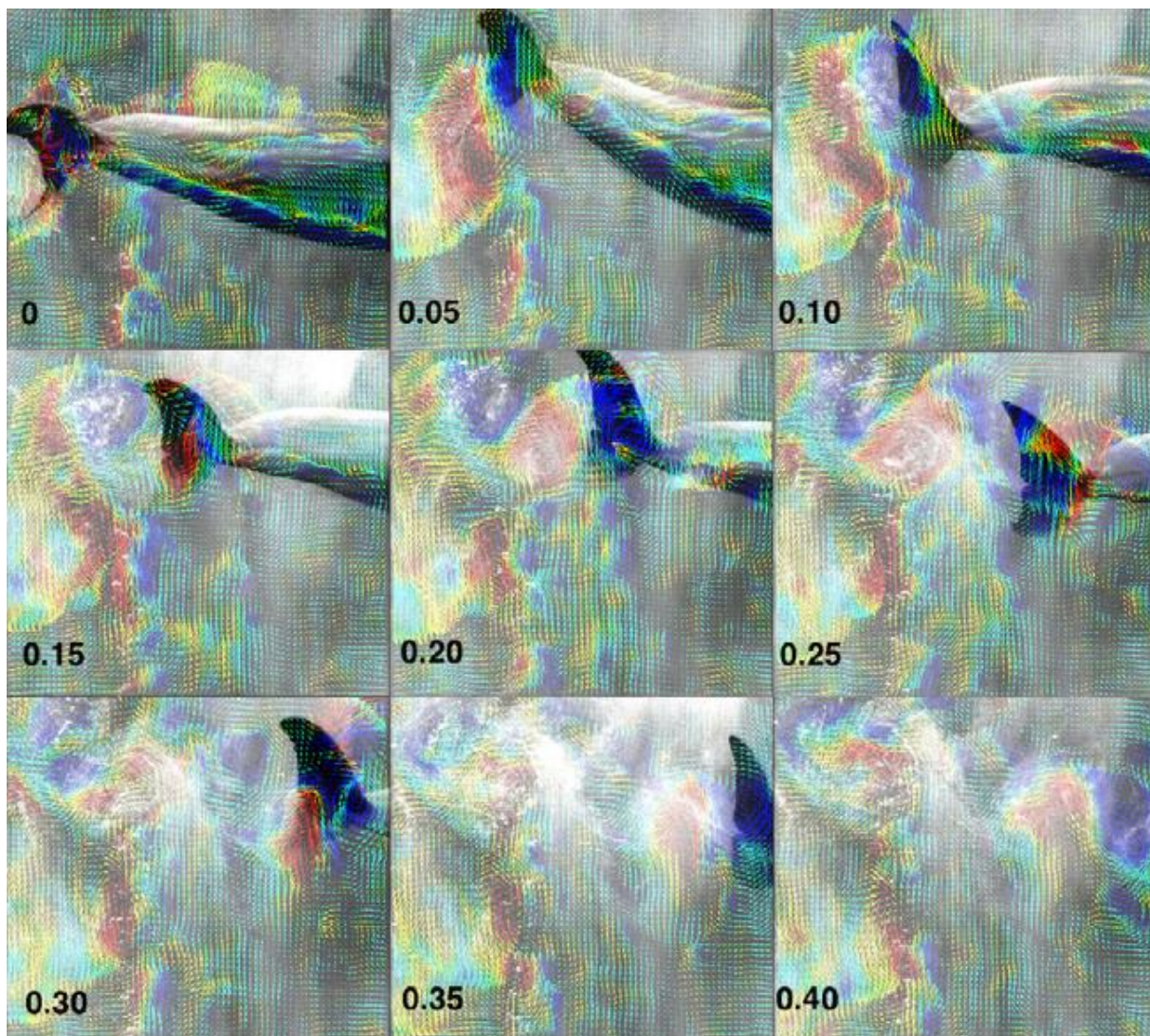
3.1.4 „Bublinková“ metoda

Mořský biolog Fish, který se zajímá o problematiku odporu mořských živočichů, dlouho hledal způsob, jak měřit tah vyvolaný delfínem. Až při vývoji měření metodou zvané PIV (integrální laserová anemometrie) viděl Fish naději na úspěch. V této technice, která se používá pro měření sil působících na obtékaná tělesa, kamera sleduje pohyb drobných částic ponořených v nádrži osvětlené laserem. Trasováním pohybu kuliček ve vodě, které obtékají ploutve delfína, by výzkumní pracovníci mohli určit rychlost částic a zpětným výpočtem tahovou sílu, kterou delfín vyprodukuje. Tato metoda je ovšem pro měření na živých organismech nevhodná z důvodu možných zdravotních rizik způsobené laserem [25].

Profesor Fish a Timothy Wei přišli s návrhem použít stěnu mikroskopických bublin vzduchu. Stěnu z bublin vytvořili v bazénu pomocí zavlažovacích hadic, které čerpaly stlačený vzduch a tím vytvořily bublinkovou stěnu. Do ní poté vypustili dva vycvičené delfíny. Jak delfíni proplouvali přes stěnu, videokamera mapovala polohu a rychlost bublin. Z této rychlosti lze vypočítat tah vyvíjený delfiní ploutví. Studie prokázala, že při prudkém zrychlování mají delfíni svaly až o 10 krát vyšší výkon jak lidské [25].

Výsledky této studie ukazují, že především svaly ocasní ploutve delfína jsou schopny vytvářet potřebnou sílu k urychlení savce při pohybu ve vodě. Prsní ploutve jsou jakousi analogií ke křídům letadla. Dodávají delfínu potřebný vztlak a slouží k manévrování. Ploutve jsou také poddajné, což umožňuje delfínům udržet vysoce účinný způsob plavání v širokém rozsahu rychlostí. Delfín má tedy pravděpodobně schopnost ovládat pružnost svého těla. Jedna z možností jak zvyšují svůj výkon je tím, že zvyšují svou tuhost těla, což zvyšuje účinnost plavání při vyšších rychlostech. Druhá hypotéza říká, že delfíni mohou aktivně řídit tuhost ploutví změnou napínání šlach. Která z hypotéz je pravdivá, není zatím zcela jasné, je ovšem dokázán fakt, že Grayův paradox není platný [21].

Na obr. 24 je ukázán cyklus vlnění ocasní ploutve delfína s časem uvedených v sekundách. Vektory rychlostí jsou označené barevně. Červené šipky ukazují rotaci po směru hodinových ručiček a modré zobrazují rotaci proti směru hodinových ručiček [25].



Obr. 24: Cyklus vlnění ocasní ploutve delfína [25]

3.2 Keporkak

Keporkak (plejtvák dlouhoploutvý) patří mezi největší živočichy vodního prostředí. Je znám svými vysokými výpady (obr. 25) nad hladinu moře či charakteristickými zvukovými efekty. Mezi kytovci dosahuje relativně krátké délky, ale za to jeho tělo je značně široké. Jak již druhotné jméno tohoto savce napovídá, keporkak je vybaven velmi dlouhou ploutví, která je navíc vysoce štíhlá, extrémně pohyblivá a po celé její délce vykazuje určitou flexibilitu. Ovšem co je na keporkakově ploutvi nejzajímavější, je tvar její přední (náběžné) hrany [28].



Obr. 25: Keporkak při výskoku [15]

3.2.1 Morfologie ploutví

Na první pohled lze vypožorovat, že náběžná hrana ploutve není hladká, jak je možné vidět u ostatních živočichů tohoto řádu, ale ploutev je „ozdobena“ hrbolatými výrůstky (obr. 26). Výrůstky jsou uspořádány přibližně sinusoidálně v podobě zaoblených hrbolků, které dodávají ploutvi vroubkovaný vzhled. Tyto hrbolky jsou pravděpodobně pozůstatky článků prstů, které měli vysoce vyvinuty jeho předci obývající souš. Velikost hrbolků směrem ke konci ploutve postupně klesá, avšak vzdálenosti mezi jednotlivými výrůstky zůstávají poměrně stálé.



Obr. 26: Vroubkovaná ploutev keporkaka [19]

Výrůstky poskytují výhodu v manévrovatelnosti a v zachycení kořisti. Působí jako kontrolní mechanismy pro udržení vztlaku a zabraňují odtržení proudu při vyšších úhlech náběhu. Pokud by byly ploutve při plavání nakloněny na příliš vysoký úhel náběhu, došlo by k odtržení proudu a velryba by ztratila schopnost ovládat svůj pohyb, neměla by možnost se otáčet. To by pro ni mohlo být zvláště při lovu velmi nevýhodné kvůli možnému úniku kořisti. Jistou analogii tohoto děje lze ukázat na příkladu jízdy automobilu do zatáčky na zledovatělé silnici, kdy řidič při sebevětší snaze nedokáže vozidlo ovládat [28].

Keporkak má ojedinělou techniku lovu. Je známa pod názvem „bublinková síť“. Skupinka keporkaků podpluje hejno ryb a začne vypouštět ze svého dýchacího ústrojí bubliny. Keporkaci se (při stálém úniku vzduchu do vody) pohybují spirálovitě směrem k hladině a postupně zmenšují průměr spirály (obr. 27). Tím se hejno ryb nahustí na malý prostor a posléze skupiny keporkaků při pohybu nad hladinu zachytí hejno do tlamy [20]. Pravděpodobně pro tyto lovecké manévry mají keporkaci vyvinutou speciálně tvarovanou ploutev.



Obr. 27: Pohled na „bublinkovou síť“ [20]

3.2.2 Test v aerodynamickém tunelu [6]

David S. Miklosovic provedl v roce 2004 experiment s modely ploutve s vroubkovanou a hladkou náběžnou hranou v nízko rychlostním aerodynamickém tunelu s uzavřeným okruhem v Naval Academy ve Spojených státech amerických. Měření bylo provedeno za podmínek nestlačitelného proudění simulováním hydrodynamických podmínek při obtékání ploutve keporkaka. Obě ploutve byly testovány v rozsahu úhlu náběhu $-2^\circ < \alpha < 20^\circ$ a v rozmezí $5,05 \cdot 10^5 < Re < 5,2 \cdot 10^5$. Keporkak se při lovu pohybuje v hodnotách blízkých $Re = 10^6$. Pro měření okamžité rychlosti a vzdušné hustoty byly použity tlakové snímače a termočlánky.



Obr. 28: Modely ploutví [10]

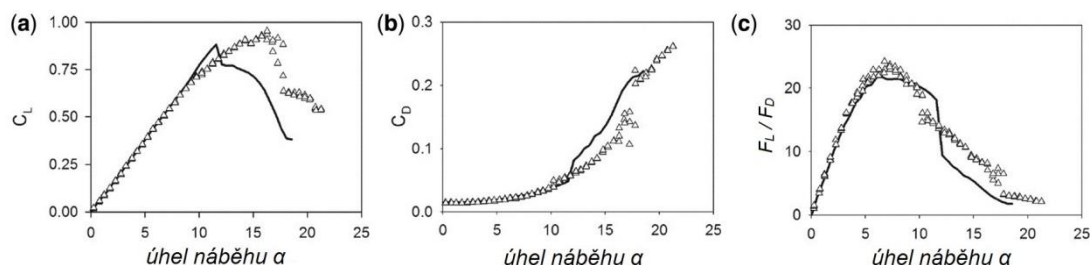
V této studii bylo provedeno měření vztlaku a odporu v závislosti na úhlu náběhu na zmenšených modelech obou ploutví. Z pozorování jednotlivých keporkaků byla vysledována jistá proměnlivost ve velikostech a tvarech hrbolků. Proto byla modelována jen hrubá morfologie, která byla společná pro všechny jedince. První model byl zkonstruován jako hladký bez charakteristických výrůstků. Na náběžné hraně druhého testovaného modelu byl vytvořen sinusoidální profil, který do jisté míry imitoval profil keporkakovy ploutve. Oba polykarbonátové modely byly zhotoveny na CNC frézce. Modely jsou znázorněny na obr. 28.

Hlavními bezrozměrnými charakteristikami popisující síly působící na testované modely při proudění jsou součinitel odporu C_D a součinitel vztlaku C_L . V průběhu experimentu došlo také k měření bočních sil, nicméně ty v něm nebyly zaznamenány. Hodnota plošného obsahu průmětu modelu do půdorysu byla z rozměrů modelů stanovena na hodnotu $A=737,7\text{cm}^2$.

V grafech (a), (b) a (c) na obr. 29 spojitě křivky demonstrují průměrná data pro model konvenční ploutve a trojúhelníky v grafu vyznačují model ploutve keporkaka. Graf (a) vyjadřuje závislost součinitele vztlaku C_L na úhlu náběhu α . Z grafu lze vysledovat, že nástup odtržení proudu, což je spojeno s prudkým poklesem součinitele vztlaku, je oddáleno z hodnoty $12,1^\circ$ u hladké ploutve na hodnotu $16,3^\circ$ pro vroubkovanou ploutev. Navíc vroubkovaná ploutev zvyšuje maximální vztlak a snižuje odpor.

V rozmezí úhlu náběhu $\alpha < 8,5^\circ$ si lze povšimnout, že obě ploutve vykazují téměř stejnou hodnotu součinitele vztlaku. V intervalu úhlu náběhu $10,3^\circ < \alpha < 12^\circ$ je součinitel vztlaku pro hladkou ploutev vyšší než pro vroubkovanou. Model vroubkované ploutve vykazuje od hodnoty úhlu náběhu $\alpha = 12,1^\circ$ vyšší vztlak.

Graf (b) znázorňuje závislost součinitele odporu na úhlu náběhu pro oba modely ploutví. Tato závislost lépe vystihuje aerodynamické jevy, jakými jsou např. připojený tok, částečné odtržení proudy a hluboké odtržení proudy. Částečné odtržení proudy je spojeno s odtržením proudy pouze v oblasti na konci ploutve. Právě tato oblast je oproti zbytku ploutve náchylnější k tomuto jevu. Při hlubokém odtržení proudy dochází k odtržení proudy po celé délce ploutve. Pro hodnoty $10,3^\circ < \alpha < 11,8^\circ$ je pro vroubkovaný model součinitel odporu až o 34% vyšší. Mimo tento rozsah ovšem již vroubkovaný model vykazuje trvale nižší součinitel odporu a to až o 32%.



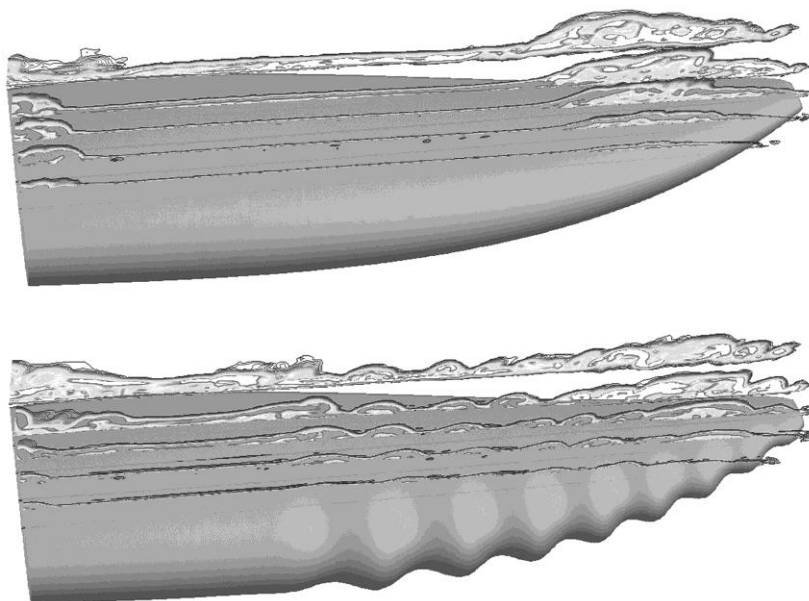
Obr. 29: Grafy srovnávající oba modely [10]

Pokud je brán v úvahu poměr vztlakové a odporové složky sil v závislosti na úhlu náběhu, hovoříme o tzv. aerodynamické účinnosti. Tato charakteristika vztlaku a odporu je velmi důležitá pro pohyb vodních tvorů, avšak i v technické sféře hraje významnou roli. Například v letectví se konstruktéři snaží navrhnout tvar křídla tak, aby vykazoval co největší aerodynamickou účinnost. Graf (c) ukazuje porovnání této charakteristiky pro vroubkovaný a hladký model. Maximum aerodynamické účinnosti nastává přibližně pro stejný úhel náběhu ($\alpha = 7,5^\circ$), avšak pro vroubkovaný model má vyšší hodnotu.

3.2.3 Výpočetní technika [10]

Využití výpočetní techniky bylo přínosné pro pochopení proudění kolem keporkakovy ploutve. I když komplexnost struktury, designu a kinematiky skutečných ploutví nemůže být pomocí numerických simulací adekvátně analyzována, zavedením určitých zjednodušení v geometrii ploutve lze už na jisté úrovni dobře výpočetně zkoumat.

Výpočtový model pomocí metody RANS použil stejnou geometrii jak testovaný model v aerodynamickém tunelu, který provedl Miklosovic. Výsledky byly ve velmi dobré shodě. Numerická simulace potvrdila, že při obtékání keporkakovy ploutve hrbolky vytvářejí víry, které zintenzivní výměnu hybnosti v blízkosti povrchu ploutve. Z obrázku je patrné, že v případě modelu vroubkované ploutve se přímo za hrbolky tvoří víry, jejichž osy jsou rovnoběžné se směrem proudění. Toto víření zapříčiní zrovnoměrnění rychlostního profilu a tím i oddálení odtržení proudy. Numerické řešení je ukázáno na obr. 30.



Obr. 30: Znáznornění výpočtového modelu hladké a vroubkované ploutve [10]

3.2.4 Aplikace výrůstků v praxi

Málokterý pasivní účinek při obtékání těles podobný profilu křídla dokáže oddálit odtržení proudů a zároveň zvýšit vztlak a snížit odpor. Právě aplikace ploutve kepokaka má ambici těchto výhod využít pro konstrukci řídicích ploch vrtulí, ventilátorů či turbín. Stejně jak u kepokaků, tak i v technické praxi bude mít tato technologie vliv na zvýšení ovladatelnosti. Weber v roce 2010 zkoumal hydrodynamické vlastnosti hrbolků na kormidlech o nízké štiřlosti profilu. Zjistil, že při úhlu náběhu vyšších jak 22° a hodnotě $Re = 20 \cdot 10^4$ produkuje hrbolaté kormidlo vyšší vztlakovou sílu ve srovnání s hladkým kormidlem. Při vyšších hodnotách Re tento efekt již nebyl tak patrný. Hrbolky navíc při vyšších hodnotách Re urychlují výskyt kavitace, která je nežádoucím jevem [10].



Obr. 31: Model tryskového letadla [10]

Pasivní povaha hrbolků může být vhodná zejména pro aplikaci na křídlech letadel, které se pohybují v režimu s vysokým úhlem náběhu. Toho lze využít například na letounech pro všeobecné letectví, což zahrnuje malá obchodní letadla, rekreační či sportovní letectví a na listech vrtulí helikoptér. Na obr. 31 je uveden model komerčního tryskového letadla s hrbolky na náběžné hraně křídel a stabilizátorů. Zavedením této technologie by mohlo dojít k nahrazení stávajících kontrolních prvků letounů (křídélka, stabilizátory), které oddalují odtržení proudů. Odstraněním těchto konvenčních částí by se mohla zvýšit bezpečnost a snížit hmotnost a s tím spojené náklady na palivo [10].



Obr. 32: Stropní ventilátor a počítačový větrák (vlevo) firmy Seaforth Energy [11]

Společnost s názvem Seaforth Energy, což je největší kanadská firma zabývající se výrobou stropních ventilátorů, se taktéž nechala inspirovat tímto principem a technologii využívá pro konstrukci větrných turbín, ventilátorů a čerpadel s cílem zlepšit jejich účinnost, bezpečnost a efektivnost [11]. Ukázka stropního ventilátoru a větráku do počítače je uvedena na obr. 32.

Tento revoluční design stropních ventilátorů umožňuje rozhýbávat o 20% více vzduchu oproti konvenčním

modelům a to dokonce jen pomocí poloviny lopatek, přičemž spotřebují až o 25% méně energie. Vzhledem k účinnosti lopatek lze ventilátory provozovat i při nižších rychlostech. Užitečnost této technologie může být enormní, protože ventilátory či větráky, které jsou používány pro chlazení, jsou prvkem téměř všech elektronických přístrojů, od počítačů a mikrovlnných trub až ke kompresorům nebo turbínám [11].

3.3 Žraloci

Žraloci, patřící do třídy paryby, jsou v představách lidí bráni jako krvežízniví predátoři moří a oceánů. Ve skutečnosti patří mezi ohrožený druh, který je systematicky vybíjen. Jejich stavba těla je natolik unikátní, že by případné vyhynutí znemožnilo pokračující



Obr. 33: Žralok mako [17]

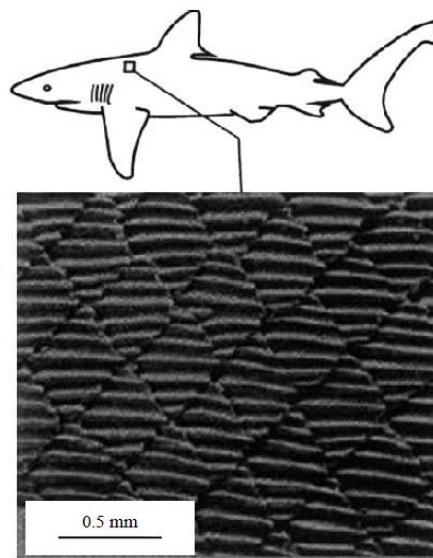
výzkum na tomto tvorů. Pohledem na pokrývku těla proplouvajícího žraloka se může zdát, že jejich kůže je ideálně hladká. Při bližším pozorování ovšem nalezneme strukturu, která je složena ze skupin drsných šupin.

Rychle plovoucí žraloci, mezi které patří také žralok mako (obr. 33), mají vyvinut unikátní mechanismus snižující odpor vodního prostředí. Jejich tělo je pokryto šupinami ve tvaru „V“, které jsou mezi sebou pružně spojeny a mohou se natáčet a tím měnit úhel náběhu dle potřeby žraloka [13].

Jejich kůže nejen že chrání žraloky před biologickým znečištěním, ale má i speciální strukturu, která snižuje odpor vodního prostředí. Drobné šupinky, pokrývající kůži rychle plovoucích žraloků, mají tvar strukturovaných drážek o velikosti v řádech mikro až nanometrů, které jsou zarovnané vzhledem ke směru proudění (obr. 34). Bylo prokázáno, že tato struktura může snížit odpor prostředí až o 9,9%. Vzdálenost mezi těmito „kožními zuby“ je tak malá, že vodní mikroorganismy mají potíže se na povrchu kůže zachytit. To je pro žraloky velice důležité, protože případní paraziti ulpívající na kůži by mohli významně zvýšit odpor. Proto profil napodobující kůži žraloka našel uplatnění i ve zdravotnickém průmyslu. U pomalejších žraloků je jejich kůže také pokryta „kožními zuby“, avšak ty nevykazují tvar, který by jim poskytoval energetickou výhodu [13].

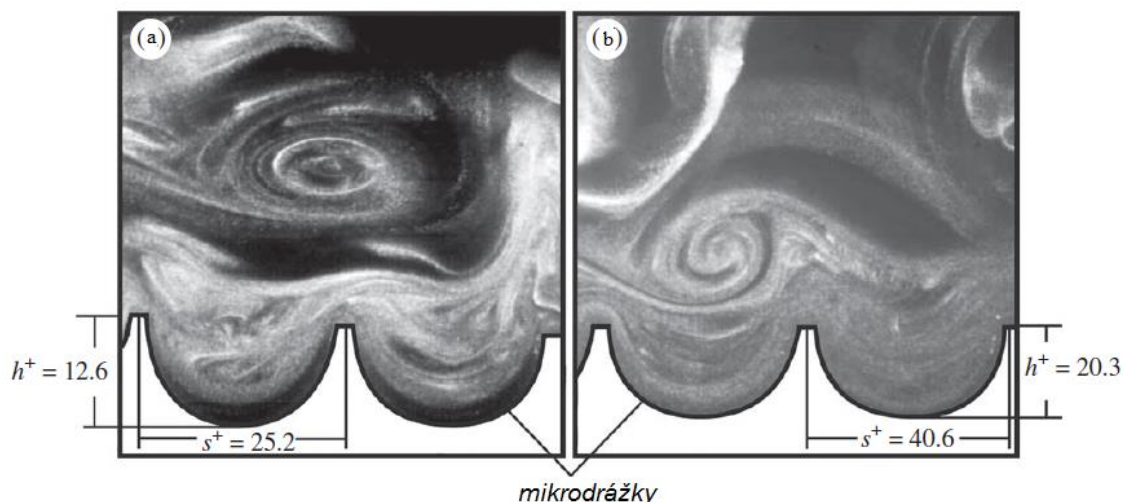
Pokud by došlo na srovnání kůže žraloka s hladkým povrchem, mohlo by se zdát, že drážky budou navyšovat odpor a to z toho důvodu, že naroste velikost obtékané plochy. Navýšení obsahu povrchu je spojeno s nárůstem celkového smykového napětí, jelikož ve srovnání s hladkým povrchem působí na větší ploše. Při laminárním proudění skutečně dochází ke zvýšení odporu [13].

V případě turbulentního proudění kolem žraločí kůže dochází ke vzniku vírů, které mají osu rotace rovnoběžnou jak se směrem proudění, tak vznikají i víry s osou ve směru kolmém na proudění. Při vzniku vírů nad povrchem je profil vypudí směrem od povrchu a udržuje je pouze na špičkách drážek. V důsledku toho dojde pouze na těchto místech k lokálnímu zvýšení smykového napětí [13].



Obr. 34: Pohled na šupiny žraločí kůže [13]

Zbylá místa na povrchu (v údolí drážek) nejsou ovlivněna tímto vířením, proto v těchto lokacích působí poměrně nízké smykové napětí. V údolí drážek se nicméně vytváří přechodné sekundární vírové útvary. Účinek přechodných sekundárních vírů je tak nízký, že je zvýšení smykového napětí na těchto místech minimální [13]. Vliv mikrodrážek demonstruje obr. 35, kde horní index $^+$ označuje bezrozměrnou veličinu.

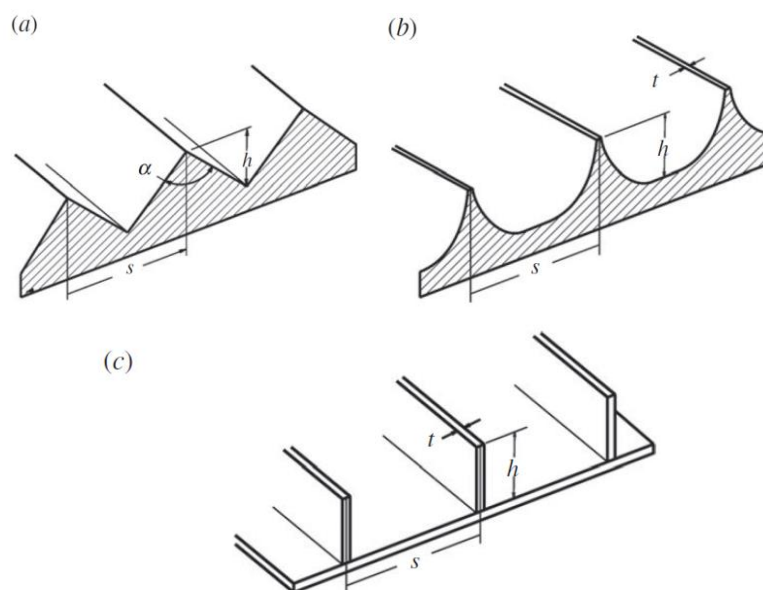


Obr. 35: Vizualizace turbulentního proudění pro vertikální řez mikrodrážkami geometrie mikrodrážek: (a) snižující odpor, (b) zvyšující odpor [13]

3.3.1 Optimalizace mikrodrážek [13]

V průběhu několika posledních let byly studovány různé tvary profilů mikrodrážek pro jejich možné vlastnosti snižující odpor. Nejvíce se prozkoumaly 2D mikrodrážky s pilovitým, sinusoidálním a žebrovaným tvarem profilu (obr. 36). Prokázalo se, že u žebrovaného tvaru profilu se snižuje odpor až o téměř 10% pro daný optimální poměr $h/s \sim 0,5$, kde h je výška a s šířka profilu. Maximální možná úspora odporu pro sinusoidální profil je při poměru $h/s \sim 0,7$ asi 6% a pro pilovitý tvar se jednalo o přibližně 5% snížení pro úhel profilu $\alpha \sim 54^\circ$ a pro poměr $h/s \sim 1$. Při studování a vyhodnocení jiných tvarů profilu se dosahovalo výsledků do 5% v redukci odporu. Z těchto uvedených dat je patrné, že nejvýhodnějším profilem se zdá být žebrovaný tvar drážkování. Ačkoli tato struktura poskytuje nejlepší vlastnosti v oblasti snížení odporu, křehká povaha této struktury znemožňuje širší technické využití. Sinusoidální a pilovité drážkování, které poskytují menší výhodu, jsou ovšem mnohem více mechanicky odolnější, a proto se využívají pro aplikace i v prostředí, kde je možný kontakt s netekutými materiály.

Při studiu trojrozměrných mikrodrážek, které lépe odpovídají skutečné struktuře žraločí kůže, bylo zjištěno, že neposkytují větší energetické výhodnosti oproti mikrodrážkám dvourozměrným. Negativem pro případnou imitaci žraločích šupin 3D drážkami je vyšší nákladnost na výrobu, proto se v technických aplikacích pracuje především s 2D modely.



Obr. 36: Ukázka 2D mikrodrážek tvaru: (a) pilovitého (b) sinusoidálního (c) žebrovaného [13]

3.3.2 Výroba mikrodrážek [13]

Výroba šupin na bázi mikrodrážek je finančně náročná, proto je na zvážení, zdali bude výhodné v technických aplikacích této technologie využívat. Drážky se zpravidla zhotovují frézováním či technologií odlévání používanou v mikro technologickém průmyslu. Při experimentování na modelech není moc vhodné použití proudu vzduchu, protože v tomto prostředí by pro zachování Reynoldsova čísla vyžadovalo rozpětí drážek menší než 1 mm. Mnohem vhodnější je model ponořit do oleje, který má vyšší viskozitu. Tím je možno zvýšit rozteč drážek na hodnoty od 3 do 10 mm, což je na výrobu méně náročné.

3.3.3 Využití mikrodrážek pro snižování odporu

Mikrodrážky inspirované kůží žraloka poskytují značnou redukci odporu pouze u takových proudění obtékaných těles, kde je dominantní formou odpor způsobený třecím napětím. Z toho plyne, že mikrodrážky poskytují určitou výhodu pouze na objektech určitého tvaru. Jsou vhodné zvláště pro relativně plochá a dlouhá tělesa, u kterých je velká část odporu způsobena turbulencí vírů na jejím povrchu. U těchto objektů mají mikrodrážky znatelný pozitivní účinek. Naopak například u automobilů, kde převládá tlakový odpor, by měla aplikace této revoluční technologie minimální přínos. Hladký povrch letadla snižuje tření při nižší rychlosti letadla, ale ve vysoké rychlosti jsou mikrodrážky mnohem výhodnější, protože snižují odpor tím, že redukují vliv turbulence [13].

Studie prokázaly, že tření na povrchu letadel zaujímá asi 48% z celkového odporu. Proto pro letecké společnosti je „žraločí technologie“ velmi zajímavá. Speciální nátěr ovšem může u letadel pokrývat nanejvýš 70% z celkového povrchu, protože na určité části letadla nemůže být tato technologie aplikována (např. u oken kvůli viditelnosti). Airbus a německá letecká společnost Lufthansa pracují společně na testování povlaku imitující žraločí kůži na svých letounech. Povlak je vytvořen přitisknutím speciálně tvarované šablony na vrstvu čerstvého nátěru. Jeden z velkých problémů je trvanlivost struktury. Aby byla zaručena správná funkčnost této technologie, je nutné nátěr obnovovat každých 5 let. Podle německých vědců by nanesením tohoto povlaku na veškerá letadla na světě bylo možné ušetřit 3% z celkových nákladů na palivo, což představuje ročně až 4,5 mil. tun pohonných hmot. Na obr. 37 (vpravo) je ukázka aplikování speciální vrstvy v lakovně Eirtech Aviation Czech Republic sídlící v Ostravě [18].

Technologie byla také využita na vývoj revolučních plavek FAST SKIN od společnosti Speedo (obr. 37 (vlevo)) [13].



Obr. 37: Revoluční plavky společnosti Speedo (vlevo) [16], nanesená vrstva „žraločí kůže“ na povrch letadla v lakovně Eirtech Aviation Czech Republic (vpravo) [18]

3.3.4 Účinky slizu a polymerních látek [13]

Ryby, jak známo, během svého pohybu ve vodním prostředí vylučují sliz, který se mísí s kapalinou v mezní vrstvě a redukuje účinky odporu. Žraloci nevylučují tolik slizu jako ryby, ale to jim stačí pro využití tohoto principu. Zjistilo se, že některé druhy ryb během plavání mění množství produkce slizu.

Bylo provedeno mnoho experimentů porovnávající model pokrytý rybím slizem s modelem bez slizu. Zjistili se až 50% úspory v třecím odporu. Tento princip je dobře aplikovatelný v ropném průmyslu. Interakce mezi polymerním činidlem (s vlastnostmi podobnými slizu ryb) a molekulou vody způsobuje v turbulentním proudění významné snížení odporu. Avšak aplikovat tento princip například na mořská plavidla by nebylo výhodné, jelikož by to vyžadovalo stálé vstřikování polymerních látek do mezní vrstvy. Těchto látek by bylo potřeba velké množství, což by vedlo ke značné finanční náročnosti.

4 Závěr

Bakalářská práce je rozčleněna do dvou hlavních částí. V první jsou popsány základní teoretické pojmy s cílem uvést čtenáře do problematiky obtékání těles v kapalinách. V druhé části jsou uvedeni konkrétní vodní živočichové, kteří využívají nějakého principu ke snižování hydrodynamického odporu. Tato práce je zaměřena na žraloky, delfíny a keporkaka.

Cílem této bakalářské práce bylo především nastudovat, na jakém principu fungují mechanismy mořských živočichů, které významně snižují odpor vodního prostředí. Příroda, jak známo, obdařila tvory různými prvky, které buď snižují hydrodynamický odpor, nebo zvyšují potřebný tah pro dosažení vyšší rychlosti. Úkolem vědců a výzkumných pracovníků je studovat dané přírodní principy dle dostupných prostředků. Důležité je se zaměřit na pochopení daného principu a posléze jej vhodně využít v takových praktických situacích, ve kterých by poskytl určité zvýhodnění. Při uvádění nové revoluční technologie do praxe je zapotřebí zvážit, zdali bude natolik přínosná, aby pokryla veškeré náklady spojené se zavedením této technologie do konkrétních aplikací.

Delfini byli vždy velmi sledovanou skupinou vodních živočichů. Ve 2. pol. 20. století jim byla přisuzována schopnost udržování laminární mezní vrstvy po celém obtékaném povrchu těla, což by vedlo ke snížení třecího odporu. To by dle Kramera mělo být uskutečněno deformováním kůže, která by tlumila tzv. Tollmien – Schlichtingovy vlny. Viskózní tlumení ovšem nezaručuje laminární mezní vrstvu, ale pouze oddaluje přechod z laminárního do turbulentního proudění, což neposkytuje tak značnou výhodu. U delfinů ovšem byla prokázána skutečnost, že jejich svalová hmota je o mnoho výkonnější než u běžných savců. Toto zjištění ovšem není pro technické aplikace natolik významné, protože inženýři se zajímají především o mechanismy snižující odpor. Od delfína se mohou inspirovat především jeho hydrodynamickým tvarem těla a viskózním tlumením kůže.

Keaporkak je přírodou obdařen speciálně tvarovanými ploutvemi, které mají hrbolatou náběžnou hranu. Ty způsobují tvorbu víru, které zrovnoměrní rychlostní profil a tím oddalují odtržení proudy, které je spojeno se značným nárůstem tlakového odporu. Tohoto principu se úspěšně využívá v konstrukci ventilátorů, lopatek turbín nebo křídel letadel.

Účinky snižování hydrodynamického odporu u žraloků spočívá v jejich struktuře kůže. Šupinky pokrývající tělo žraloků jsou ovšem přínosné jen při turbulentním proudění, kdy tato struktura zajišťuje snížení účinků vírových útvarů, které zvyšují třecí odpor. Tento princip je tedy aplikovatelný pro takové situace, kde převládá turbulentní proudění. V praxi se toho využívá nanášením speciálního nátěru na povrch letadel a ponorek, což jsou právě příklady aplikací, kde převládá třecí odpor nad tlakovým.

Může se zdát, že díky rozvoji simulací proudění pomocí výpočetní techniky a zavedením nových experimentálních metod v aerodynamických tunelech jsou tyto metody řešení na tak vysoké úrovni, že již jsou veškeré principy pochopeny. Tak tomu ve skutečnosti není. Příroda v sobě ukrývá ještě mnoho záhad a otázek, na které bude zapotřebí najít odpověď.

5 Seznam použitých zdrojů

- [1] MUNSON, Bruce, Theodore OKIISHI, Donald YOUNG. *Fundamentals of fluid mechanics*. 3rd ed. update. New York: Wiley, 1998. 877 s. ISBN 04-713-5502-X.
- [2] ŠOB, František. *Hydromechanika*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. 238 s. ISBN 978-80-214-3578-0.3
- [3] JANALÍK, Jaroslav. *Hydrodynamika a hydrodynamické stroje*. skripta, Ostrava: VŠB- TU, FS, 2008, 189 s. Dostupné z WWW: <http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/338-Janalik-Hydrodynamika-a-hydrodynamicke-stroje.pdf>
- [4] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008, 108 s. ISBN 978-80-248-1911-2. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>
- [5] ZEUCH, Martin. *Bionika*. 1. vyd. Ilustrace Eberhard Reimann. Plzeň: Fraus, c2008, 48 s. Co-jak-proč. ISBN 978-80-7238-714-4.
- [6] MIKLOSOVIC, D. S., M. M. MURRAY, L. E. HOWLE a F. E. FISH. Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers. *Physics of Fluids* [online]. 2004, vol. 16, issue 5, [cit. 2014-04-26]. DOI: 10.1063/1.1688341. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/16/5/10.1063/1.1688341>
- [7] FISH, Frank E. The myth and reality of Gray's paradox: implication of dolphin drag reduction for technology. *Bioinspiration* [online]. 2006, s. 17-25 [cit. 2014-04-26]. DOI: 10.1088/1748-3182/1/2/R01. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1748-3190/1/i=2/a=R01?key=crossref.05657f0c7b702d5d9dc96fb29a19b5bd>
- [8] SOUČKOVÁ, N., P. KOLÁŘ a A. TUČEK. *Simulace proudění tekutin pomocí CFD* [online]. 2012, s. 18-20 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: https://cms3.nux.cz/techsoft-eng.cz/content/files/7_6_clanek7.pdf
- [9] PAVELEK, Milan, Eva JANOTKOVÁ a Josef ŠTĚTINA. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. 2. vyd. Brno, 2007 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/>
- [10] FISH, F. E., P. W. WEBER, M. M. MURRAY a L. E. HOWLE. The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology. *Integrative and Comparative Biology* [online]. 2011, s. 203-213 [cit. 2014-05-08]. DOI: 10.1093/icb/icr016. Dostupné z: <http://icb.oxfordjournals.org/content/51/1/203.full>
- [11] MCLEOD, Mike. WhalePower's Humpback-inspired Tubercle Technology marks next evolution in airfoil design. *Design Engineering* [online]. 2010 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.design-engineering.com/features/whale-of-an-idea>
- [12] BORGNAT, P. a L. SHAO. *Methods for large-eddy simulation (LES) of complex flows* [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://lmfa.ec-lyon.fr/index.php?name=jerome.boudet>

- [13] DEAN, B. a B. BHUSHAN. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2010, s. 4775-4806 [cit. 2014-04-26]. DOI: 10.1098/rsta.2010.0201. Dostupné z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsta.2010.0201>
- [14] RYAN, Tom. Process dolphins use to swim fast. *Demand Media* [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://animals.pawnation.com/process-dolphins-use-swim-fast-7577.html>
- [15] DUFFY, Emmett. Humpback whale speaks, says “Thank you”. *SeaMonster* [online]. 20. 7. 2011 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://theseammonster.net/2011/07/humpback-whales-speaks-says-thank-you/>
- [16] PRESTON, Elizabeth. Your Sharkskin Speedo Makes Sharks Scoff. *Inkfish* [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://inkfish.fieldofscience.com/2012/02/your-sharkskin-speedo-makes-sharks.html>
- [17] Shortfin mako shark. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. 7. 5. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Isurus_oxyrinchus_by_mark_conlin2.JPG
- [18] BENNETT, Drake. Airplanes With Sharks' Skin? It May Cut Fuel Burn. *Bloomberg Businessweek* [online]. 2013 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.businessweek.com/articles/2013-02-25/airplanes-with-sharks-skin-it-may-cut-fuel-burn>
- [19] FLIPPERS PROVIDE LIFT, REDUCE DRAG: HUMPBACK WHALE. In: *Ask Nature* [online]. 2008 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.asknature.org/strategy/3f2fb504a0cd000eae85d5dcc4915dd4#.U3EgU_l_s0J
- [20] Humpback whale. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. 11. 5. 2014 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Humpback_whale
- [21] JANE J., Lee. Mystery Solved: How Do Dolphins Swim So Fast?. *National Geographic* [online]. 15. 1. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://news.nationalgeographic.com/news/2014/01/140115-bottlenose-dolphins-swimming-paradox-ocean-animals-science/>
- [22] USS Albacore (AGSS-569). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 21. 4. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Albacore_\(AGSS-569\)](http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Albacore_(AGSS-569))
- [23] BIO-MIMETIC DRAG REDUCTION – PART 3: MORPHING. In: *FUGAHUMANA – HUMAN FLIGHT* [online]. 5. 4. 2012 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://fugahumana.wordpress.com/2012/04/05/bio-mimetic-drag-reduction-part-3-morphing/>
- [24] Water tunnel (hydrodynamic). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 1.4.2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Water_tunnel_\(hydrodynamic\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Water_tunnel_(hydrodynamic))

- [25] BALUKJIAN, Brad. The Secret to Dolphins' Swimming Speeds. *Discover* [online]. 23. 1. 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://blogs.discovermagazine.com/crux/2014/01/23/the-secret-to-dolphins-swimming-speeds/#.U3Ymyvl_s0I
- [26] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence modelování proudění - CFX* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 DVD-ROM [cit. 2014-05-15]. ISBN 978-80-248-2606-6. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FS/Tur/Turbulence.pdf>
- [27] PIV měření: Katedra energetických strojů a zařízení. *FST ZČU: Katedra energetických strojů a zařízení* [online]. © 1991 - 2013 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.kke.zcu.cz/about/vyzkum/laboratore/difuzor.html>
- [28] KNIGHT, K. Fish lays Gray's paradox to rest. *Journal of Experimental Biology* [online]. 1. 15. 2014, vol. 217, issue 2, s. 157-158 [cit. 2014-05-04]. DOI: 10.1242/jeb.101253. Dostupné z: <http://jeb.biologists.org/cgi/doi/10.1242/jeb.101253>

6 Seznam obrázků

Obr. 1: Proudění: (a) nevířivé, (b) vířivé [3]	10
Obr. 2: Proudění: (a) laminární, (b) turbulentní [3]	10
Obr. 3: Typy tělesa: (a) dvourozměrné, (b) osově symetrické, (c) trojrozměrné [1]	11
Obr. 4: Přechod z laminárního do turbulentního proudění [1]	12
Obr. 5: Mezní vrstva na ploché desce [3]	13
Obr. 6: Rychlostní profil u laminární a turbulentní mezní vrstvy [3]	13
Obr. 7: Odtržení proudu na zakřiveném povrchu [3]	14
Obr. 8: Šířka úplavu při proudění: (a) laminárním (b) turbulentním [1]	15
Obr. 9: Tlaková a třecí síla působící na element plochy povrchu tělesa [1]	16
Obr. 10: Vztlaková a odporová síla působící na těleso [1]	16
Obr. 11: Ukázka metody LES na obtékání válce [12]	17
Obr. 12: Schéma zařízení pro metodu PIV [27]	19
Obr. 13: Rozložení třecího napětí na 2D tělese [1]	21
Obr. 14: Rozložení tlaku na 2D tělese [1]	22
Obr. 15: Závislost součinitele odporu na štíhlosti [1]	22
Obr. 16: (a) válec $C_D = 1,2$ (b) těleso proudnicového tvaru $C_D = 0,12$ [1]	23
Obr. 17: Součinitel odporu v závislosti na Reynoldsově číslu pro hladkou kouli a válec [1]	24
Obr. 18: Závislost součinitele odporu na Re pro dvourozměrná tělesa různého tvaru [1]	24
Obr. 19: Součinitel odporu v závislosti na Ma pro dvourozměrná tělesa [1]	25
Obr. 20: Součinitel odporu v závislosti na Re pro kouli [1]	26
Obr. 21: Delfin skákavý [14]	27
Obr. 22: Boční a horní pohled na delfína a na jeho příčné průřezy ploutví [7]	28
Obr. 23: Americká experimentální ponorka USS Albacore (AGSS-569) [22]	28
Obr. 24: Cyklus vlnění ocasní ploutve delfína [25]	31
Obr. 25: Keporkak při výskoku [15]	32
Obr. 26: Vroubkovaná ploutev keporkaka [19]	32
Obr. 27: Pohled na „bublinkovou síť“ [20]	33
Obr. 28: Modely ploutví [10]	33
Obr. 29: Grafy srovnávající oba modely [10]	34
Obr. 30: Znázornění výpočtového modelu hladké a vroubkované ploutve [10]	35
Obr. 31: Model tryskového letadla [10]	35
Obr. 32: Stropní ventilátor a počítačový větrák (vlevo) firmy Seafort Energy [11]	36
Obr. 33: Žralok mako [17]	37
Obr. 34: Pohled na šupiny žraločí kůže [13]	37
Obr. 35: Vizualizace turbulentního proudění pro vertikální řez mikrodrážkami	38
Obr. 36: Ukázka 2D mikrodrážek tvaru: (a) pilovitého (b) sinusoidálního (c) žebrovaného [13]	39
Obr. 37: Revoluční plavky společnosti Speedo (vlevo) [16], nanesená vrstva „žraločí kůže“ na povrch letadla v lakovně Eirtech Aviation Czech Republic (vpravo) [18]	40

7 Seznam použitých symbolů a zkratek

b	[m]	Šířka, délka
c	[m.s ⁻¹]	Rychlost zvuku v kapalině
d	[m]	Charakteristický rozměr
l	[m]	Délka
p	[Pa]	Tlak kapaliny
u	[m.s ⁻¹]	Rychlost
A	[m ²]	Charakteristický průřez
C_D	[-]	Součinitel odporu
C_{Df}	[-]	Součinitel třecího odporu
C_{Dp}	[-]	Součinitel tlakového odporu
F_D	[N]	Odporová síla (odpor)
F_{Df}	[N]	Třecí odpor
F_{Dp}	[N]	Tlakový odpor
F_L	[N]	Vztlaková síla (vztlak)
F_L	[N]	Vztlaková síla (vztlak)
F_s	[N]	Boční síla
Ma	[-]	Machovo číslo
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
Re_{kr}	[-]	Kritická hodnota Reynoldsova čísla
U	[m.s ⁻¹]	Nenarušená rychlost
α	[°]	Úhel náběhu
δ	[m]	Tloušťka mezní vrstvy
ε	[m]	Drsnost povrchu
η	[Pa.s]	Dynamická viskozita
θ	[°]	Úhel
ν	[m ² .s ⁻¹]	Kinematická viskozita
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota kapaliny
τ_w	[Pa]	Smykové (třecí) napětí

8 Seznam příloh